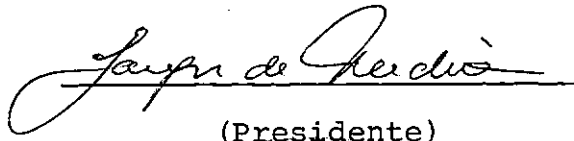


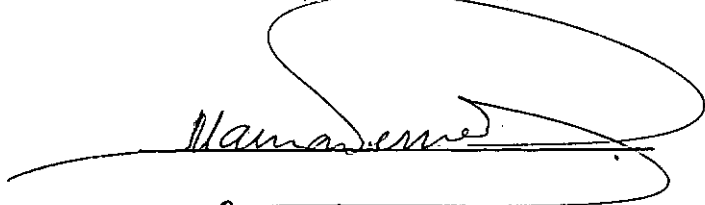
ESTUDO DA ELETRO-OSMOSE EM SOLOS FINOS

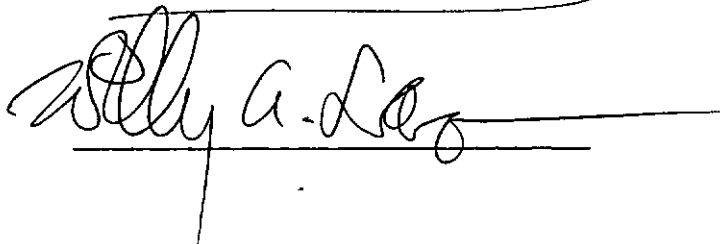
José Eduardo Saboia Castello Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.)

Aprovada por:


(Presidente)





RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 1978

CASTELLO BRANCO, JOSÉ EDUARDO SABOIA

Estudo da Eletro-Osmose em Solos Finos Rio de Janeiro
1978.

XVIII, 151 p. 29,7cm (COPPE-UFRJ, M.Sc, Engenharia
Civil, 1978)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Faculde
dade de Engenharia

1. Eletro-Osmose I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMENTOS

O autor deseja agradecer aos que possibilitaram a realização deste trabalho. Para que não se cometa nenhuma injustiça para com os diversos tipos de ajuda recebidos, serão citados em ordem alfabética os que mais diretamente colaboraram nesta pesquisa.

- ALVARO DELLÊ VIANNA
- ANGELA DE SALLES CUNHA
- CONSELHO NACIONAL DE PESQUISAS
- ENGEFER S/A
- GILSON FERNANDES
- IMACULADA CONCEIÇÃO
- JACQUES DE MEDINA
- MARI REIS DE MORAES
- MÁRIO MÁRCIO ALVARENGA
- ROZANE WERNECK DE MENEZES
- SÉRGIO IÓRIO
- THIAGO FRANCO VILELA

A todos, por sua ajuda, o autor deseja expressar sua sincera gratidão.

III

ESTUDO DA ELETRO-OSMOSE EM SOLOS FINOS

SINOPSE

Através de ensaios de laboratório , pesquisou-se o efeito da eletro-osmose em solos finos sob dois diferentes prismas: a eletro-drenagem e o eletro-endurecimento.

Com relação ao eletro-endurecimento, soluções de produtos químicos foram injetadas por eletro-osmose em amostras de solo, e observados os efeitos nos limites de Atterberg.

Com respeito à eletro-drenagem, amostras de uma argila orgânica foram adensadas sob diversos gradientes elétricos, e seus comportamentos observados durante a compressão primária e a secundária.

Para este estudo experimental, duas diferentes aparelhagens foram projetadas para que se cumprissem os objetivos acima mencionados. Uma descrição detalhada de tais aparelhagens é fornecida.

Experiências de campo e de laboratório realizadas por vários autores foram examinadas, e seus principais aspectos evidenciados de forma a servirem como guia para futuras aplicações.

STUDY OF ELECTRO-OSMOSIS IN FINE GRAINED SOILS

ABSTRACT

By using laboratory experiments, electro-osmosis in fine grained soils was surveyed under two different aspects: the electro-drainage and the electro-hardening.

In relation to the electro-hardening, solutions of chemical products were injected into soil specimens by electro-osmosis, and the effects on the limits of Atterberg observed.

With respect to electro-drainage, specimens of an organic clay were consolidated under electric gradients, and their behavior observed during primary and secondary compression.

For this experimental study, two different apparatus were designed to accomplish the objectives above mentioned. A detailed description of the equipment is given.

Past field and laboratory experiments have been reviewed, and the main features were summarized to serve as a guide for future applications.

ÉTUDE DE L'ÉLECTRO-OSMOSE DANS LES SOLS FINS

RESUMÉ

Des essais de laboratoire furent réalisés pour étudier l'électro-osmose selon deux aspects différents: l'électro-drainage et l'électro-durcissement.

Pour l'étude de l'électro-durcissement des solutions de produits chimiques furent injectées dans des échantillons de sols par l'électro-osmose, et les changements produits observés par les limites d'Atterberg.

Quant à l'électro-drainage, des éprouvettes d'une argile organique furent consolidées par des gradients électriques, et leur comportement mécanique observé pendant la compression primaire et secondaire.

Pour cette étude expérimentale deux appareils distincts furent projetés pour accomplir les objectifs ci-dessus mentionnés. Une description complète de l'équipement est donnée.

Les expériences déjà réalisées sur chantier et en laboratoire par plusieurs auteurs ont été examinées, et les aspects plus importants relevés pour qu'ils puissent servir d'aide à des futures applications.

ESTUDO DA ELETRO-OSMOSE EM SOLOS FINOS

ÍNDICE

CAPITULO I

INTRODUÇÃO, HISTÓRICO, OBJETIVOS E ESCOPO

- 1.1 Os Fenômenos Eletrocinéticos nos Solos Finos
 - 1.1.1 Potencial de Fluxo ou de Escoamento
 - 1.1.2 Eletro-Forese
 - 1.1.3 Potencial de Sedimentação ou Migração
 - 1.1.4 Eletro-Osmose
- 1.2 Os Fenômenos de Fluxo Direto e de Fluxo Conjugado
- 1.3 Histórico e Princípios da Eletro-Osmose
- 1.4 Aplicabilidade da Eletro-Osmose na Engenharia Civil
- 1.5 Objetivos e Escopo da Pesquisa
 - 1.5.1 Enfoque Experimental da Pesquisa
 - 1.5.2 Assuntos Tratados

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Introdução
- 2.2 Investigações Prévias
 - 2.2.1 Eletro-Drenagem
 - 2.2.2 Eletro-Endurecimento
 - 2.2.3 Aplicações Práticas

CAPÍTULO III

ELETRO-ENDURECIMENTO E MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE ELETRO-OSMÓTICA

- 3.1 Introdução
- 3.2 Aparelhagem
 - 3.2.1 Concepção
 - 3.2.2 Construção
 - 3.2.3 O Eletro-Permeâmetro
- 3.3 Metodologia dos Ensaios Realizados
 - 3.3.1 Permeabilidade Hidráulica

VII

- 3.3.2 Permeabilidade Eletro-Osmótica
- 3.3.3 Injeção de Produtos Químicos
- 3.3.4 Determinação dos Limites de Atterberg
- 3.4 Características dos Solos e Produtos Químicos Ensaados
 - 3.4.1 Os Solos
 - 3.4.1.1 Solo A
 - 3.4.1.2 Solo B
 - 3.4.1.3 Solo C
 - 3.4.1.4 Solo D
 - 3.4.1.5 Solo E
 - 3.4.2 Os Produtos Químicos
- 3.5 Resultados dos Ensaios Realizados
 - 3.5.1 Apresentação
 - 3.5.2 Análise dos Resultados
 - 3.5.2.1 Coeficiente de Permeabilidade Hidráulica
 - 3.5.2.2 Coeficiente de Permeabilidade Eletro-Osmótica
 - 3.5.2.3 Umidade, Grau de Saturação, Densidade dos Grãos e Ín
dices de Vazios
 - 3.5.2.4 Limites de Atterberg
 - 3.5.2.4.1 Considerações Gerais
 - 3.5.2.4.2 Discussão dos Resultados
- 3.6 Conclusões

CAPÍTULO IV

ELETRO-DRENAGEM

- 4.1 Introdução
- 4.2 As Teorias da Eletro-Drenagem
- 4.3 O Adensamento do Solo
- 4.4 Aparelhagem
 - 4.4.1 Conceção
 - 4.4.2 Construção
 - 4.4.3 A Célula de Eletro-Drenagem
- 4.5 Metodologia dos Ensaios Realizados
 - 4.5.1 Ensaios Tipo 1
 - 4.5.2 Ensaios Tipo 2
 - 4.5.3 Ensaios Tipo 3
 - 4.5.4 Ensaios Tipo 4

- 4.6 Características dos Solos Ensaiaados
- 4.6.1 Local e Forma de Coleta
- 4.6.2 Características da Argila Orgânica
- 4.7 Resultados dos Ensaaios Realizados
- 4.7.1 Ensaaios Tipo 1
- 4.7.2 Ensaaios Tipo 2
- 4.7.3 Ensaaios Tipo 3
- 4.7.4 Ensaaios Tipo 4
- 4.8 Conclusões

LISTA DAS FIGURAS

- FIG. 1 - Fenômenos Eletrocinéticos (segundo Mitchell³¹ , 1976)
- FIG. 1a - Eletro-Osmose
- FIG. 1b - Potencial de Fluxo
- FIG. 1c - Eletro-Forese
- FIG. 1d - Potencial de Migração
- FIG. 2 - Diâmetro para os quais Diferentes Métodos são Aplicáveis (segundo Mitchell³⁰ , 1970)
- FIG. 3 - Esquema do Eletro-Permeâmetro
- FIG. 4 - Medição de He
- FIG. 4a - Circuito Desligado
- FIG. 4b - Circuito Ligado
- FIG. 5 - Fluxo Eletro-Osmótico para Eletrodos como Placas Semi-Infinitas (segundo Esrig¹⁷ , 1968)
- FIG. 5a - Anodo e Catodo Drenados
- FIG. 5b - Anodo não Drenado e Catodo Drenado
- FIG. 5c - Anodo Drenado e Catodo não Drenado
- FIG. 6 - Fluxo Eletro-Osmótico para Eletrodos Cilíndricos (segundo Esrig¹⁷ , 1968)
- FIG. 6a - Anodo e Catodo Drenado
- FIG. 6b - Anodo não Drenado e Catodo Drenado
- FIG. 6c - Anodo Drenado e Catodo não Drenado
- FIG. 7 - Distribuição de Pressões Neutras Induzidas por Eletro-Osmose com Reversão de Corrente (segundo Wan⁴⁷ , 1970)
- FIG. 8 - Adensamento Unidimensional por Eletro-Osmose (segundo Esrig¹⁷ , 1968)
- FIG. 9 - Desenvolvimento de Pressão Neutra versus Fator Tempo (segundo Wan⁴³ , 1970)
- FIG. 10 - Desenvolvimento de Pressão Neutra Média versus Fator Tempo (segundo Wan⁴³ , 1970)
- FIG. 11 - Fator Tempo para o Excesso de Pressão Neutra Inicial Atingir Zero (segundo Wan⁴³ , 1970)

- FIG. 12 - Relação entre Pressões Neutras Final e Inicial versus Fator Tempo (segundo Wan⁴³, 1970)
- FIG. 13 - Comparação entre Eletro-Drenagem e Adensamento Convencional (segundo Mitchell³¹, 1976)
- FIG. 14 - Croquis de localização da Retirada de Argila Orgânica
- FIG. 15 - Curvas Tempo versus Recalques para Ensaio Convencional
- FIG. 16 - Relação Pressão versus Índice de Vazios, Permeabilidade versus Índice de Vazios e Coeficiente de Compressibilidade versus Pressão, para Ensaio Convencional
- FIG. 17 - Altura do C.P. versus Tempo Diversas Voltagens
- FIG. 18 - Deformação Específica versus Tempo para Diversas Voltagens
- FIG. 19 - Relação de Umidades versus Gradiente Elétrico
- FIG. 20 - Deformação Específica Total versus Gradiente Elétrico
- FIG. 21 - Curvas Tempo versus Recalques para Amostra Adensada Estaticamente a $2,0\text{kg/cm}^2$ e depois Eletro-Drenada (1º ensaio)
- FIG. 22 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $2,0\text{kg/cm}^2$ e depois Eletro-Drenada (2º ensaio)
- FIG. 23 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $4,0\text{kg/cm}^2$ e depois Eletro-Drenada
- FIG. 24 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $8,0\text{kg/cm}^2$ e depois Eletro-Drenada (1º ensaio)
- FIG. 25 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $8,0\text{kg/cm}^2$ e depois Eletro-Drenada (2º ensaio)
- FIG. 26 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Aden

- sada Estaticamente a $2,0\text{kg/cm}^2$ (1º ensaio)
- FIG. 27 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $2,0\text{kg/cm}^2$ (2º ensaio)
- FIG. 28 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $4,0\text{kg/cm}^2$
- FIG. 29 - Curvas Tempo versus Recalque para Amostra Adensada Estaticamente a $8,0\text{kg/cm}^2$ (1º ensaio)
- FIG. 30 - Curvas Tempo versus Recalques para Amostra Adensada Estaticamente a $8,0\text{kg/cm}^2$ (2º ensaio)
- FIG. 31 - Curvas Índice de Vazios versus Pressão para Adensamento Eletro-Osmótico e Convencional
- FIG. 32 - Pressão versus Coeficiente de Compressibilidade para Adensamento Eletro-Osmótico e Convencional
- FIG. 33 - Coeficiente de Permeabilidade Hidráulica versus Índice de Vazios para Adensamento Eletro-Osmótico e Convencional
- FIG. 34 - Gráfico Tempo versus Recalque em função das Pressões Aplicadas
- FIG. 35 - Deformação Específica versus Tempo a partir da Interrupção de Voltagem e Retirada de P'equiv.
- FIG. 36 - Curvas Pressão versus Índice de Vazios na Compressão Primária

LISTA DE FOTOS

FOTO	1	-	Vista Geral do Eletro-Permeâmetro
FOTO	2	-	Vista da Célula do Eletro-Permeâmetro
FOTO	3	-	Vista da Célula do Eletro-Permeâmetro
FOTO	4	-	Detalhes da Célula do Eletro-Permeâmetro
FOTO	5	-	Detalhes da Célula do Eletro-Permeâmetro
FOTO	6	-	Cilindro Biselado e Seus Componentes
FOTO	7	-	Célula de Eletro-Drenagem e Prensa de Adensamento
FOTO	8	-	Componentes da Célula de Eletro-Drenagem
FOTO	9	-	Sequência de Montagem de Célula de Eletro - Drenagem
FOTO	10	-	Sequência de Montagem de Célula de Eletro-Drenagem
FOTO	11	-	Sequência de Montagem de Célula de Eletro-Drenagem
FOTO	12	-	Sequência de Montagem de Célula de Eletro-Drenagem
FOTO	13	-	Sequência de Montagem de Célula de Eletro-Drenagem
FOTO	14	-	Região do Anodo após Eletro-Drenagem
FOTO	15	-	Região do Anodo após Eletro-Drenagem
FOTO	16	-	Região entre Catodo e Anodo após Eletro-Drenagem
FOTO	17	-	Região entre Catodo e Anodo após Eletro-Drenagem
FOTO	18	-	Região do Catodo após Eletro-Drenagem
FOTO	19	-	Região do Catodo após Eletro-Drenagem
FOTO	20	-	Amostra Adensada Estaticamente
FOTO	21	-	Amostra Adensada Estaticamente
FOTO	22	-	Fluimento da Bentonita
FOTO	23	-	Fluimento da Bentonita
FOTO	24	-	Fluimento da Bentonita

LISTA DE SÍMBOLOS
SÍMBOLOS ROMANOS

A	Área
Ao	Concentração de cargas elétricas
Ca,Cb	Concentrações químicas
Cc	Índice de compressão
Cs	Índice de expansão
CT	Capacidade de troca catiônica (excluídos os hidrogênios)
CTC	Capacidade de troca catiônica
C ₁	Concentração de íons na dupla camada
C ₃	Concentração de água livre na dupla camada
Cv	Coefficiente de compressibilidade
D	Condutividade química
D	Constante dielétrica
d	Distância basal
E	Potencial zeta
e	Índice vazios
ei	Índice de vazios inicial
Fo	Constante de Faraday
H	Capacidade de hidratação de íons
He	Altura de equilíbrio na eletro-osmose
Ht	Capacidade de troca de hidrogênio
hf	Carga hidráulica final
h ₀	Carga hidráulica inicial
I	Fluxo elétrico
IP	Índice de plasticidade
IPm	Índice de plasticidade após mistura com produto químico

IP +-	Índice de plasticidade após eletro-osmose
ic	Gradiente químico
ie	Gradiente elétrico
ih	Gradiente hidráulico
it	Gradiente térmico
Jd	Fluxo químico
Ji	Fluxo unitário
Kc	Coefficiente volumétrico de Piakowski
Kc	Condutividade osmótica ou química
Ke	Condutividade eletro-osmótica
Kh	Condutividade hidráulica
Ki	Coefficiente de rendimento
Ki	Razão sílica/alumina
Kr	Razão sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio
Kt	Condutividade térmica
L	Comprimento
Lii	Coefficiente de condutividade
Lij	Coefficiente de condutividade conjugada
LL	Limite de liquidez
LLm	Limite de liquidez após mistura com produto químico
LL +-	Limite de liquidez após eletro-osmose
LP	Limite de plasticidade
LPm	Limite de plasticidade após mistura com produto químico
LP +-	Limite de plasticidade após eletro-osmose
N+	Número de moles de água por mol de cation
N-	Número de moles de água por mol de anion
n	porosidade
p	Pressão
P'	Pressão efetiva

$p'equiv$	Pressão estática equivalente
$p'pa$	Pressão de pré-adensamento
q_e	Fluxo de água na eletro-osmose
q_h	Fluxo de água
q_t	Fluxo de calor
R_t	Fator de correção de temperatura para cálculo de viscosidade
r	Raio
re	Distância entre eletrodos
rw	Raio de eletrodo
S	Grau de saturação
S_i	Grau de saturação inicial
T_v	Fator Tempo
T_{vo}	Fator tempo para dissipação de poro-pressão
T_{50}	Fator tempo para 50% de adensamento
t	Tempo
t_{50}	Tempo para 50% de adensamento
$t+, t-$	Números de transporte
U	Grau de adensamento
u	Poro-pressão
u_a	Poro-pressão no anodo
u_c	Poro-pressão no catodo
u_o	Poro-pressão inicial
\bar{u}	Poro-pressão média
V	Voltagem
V	Volume
V_{max}	Voltagem máxima
V_s	Volume dos sólidos
W	Umidade

W	Fluxo de água medido
Wf	Umidade final
Wh	Peso úmido
Wi	Umidade inicial
Ws	Peso seco
Wf+	Umidade final no anodo
Wf-	Umidade final no catodo
Xi	Gradiente
Xj	Gradiente para fluxo conjugado
X ₁₃	Coeficiente de atrito entre água e cation
X ₃₄	Coeficiente de atrito entre água e dupla-camada

SÍMBOLOS GREGOS

γ_h	Peso específico úmido
γ_s	Peso específico seco
γ_{sat}	Peso específico saturado
γ_w	Peso específico da água
ΔH	Diferença de potencial hidráulico
ΔV	Diferença de potencial elétrico
δ	Densidade dos grãos
ϵ	Deformação específica
η	Viscosidade
ρ	Resistividade específica
σ	Condutividade elétrica

LISTA DE TABELAS

TABELA	1	- Fenômenos de Fluxos Diretos e Conjugados (segundo Mitchell ³¹ , 1976)
TABELA	2	- Tipos de Produtos Químicos Usados em Investigações Prévias
TABELA	3	- Quadro Geral de Resultados de Eletro - Endurecimento
TABELA	4	- Sumário das Teorias sobre Eletro-Drenagem (segundo Mitchell ³¹ , 1976)
TABELA	5	- Quadro Geral de Resultados dos Ensaio Tipo 1
TABELA	6	- Quadro Geral de Resultados dos Ensaio Tipo 2
TABELA	7	- Quadro Geral de Resultados dos Ensaio Tipo 3

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO, HISTÓRICO, OBJETIVOS E ESCOPO

1.1 Os Fenômenos Eletrocinéticos nos Solos Finos

A combinação de gradientes e fluxos elétricos e hidráulicos pode ser responsável por quatro fenômenos eletrocinéticos no sistema solo (colóide) - água - eletrólito, onde partículas carregadas são cargas móveis de sinal contrário.

Cada fenômeno envolve movimentos relativos de eletricidade, superfícies carregadas e fases líquidas, como mostrado esquematicamente na Fig. 1.

1.1.1 Potencial de Fluxo ou de Escoamento

Quando há fluxo d'água no interior de um solo sob ação de gradiente hidráulico, Fig. 1b, as cargas elétricas externas (cations adsorvidos) da dupla camada são deslocadas na direção do fluxo.

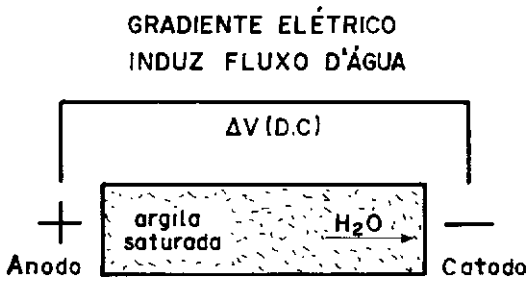
O resultado é uma diferença de potencial elétrico, proporcional à vazão hidráulica, nos extremos da massa de solo. Esta diferença de potencial é chamada de "Potencial de Fluxo".

1.1.2 Eletroforese

Se uma diferença de potencial elétrico é aplicada através de uma suspensão de argila coloidal, as partículas carregadas são atraídas eletrostaticamente a um dos eletrodos e repelidas pelo outro, devido a interação do campo elétrico aplicado e cargas de partículas. Partículas carregadas negativamente são atraídas pelo anodo como mostra a Fig. 1c. Isto é chamado eletroforese. Eletroforese envolve transporte de partículas de solo através d'água e eletro-osmose o transporte d'água através das partículas de solo.

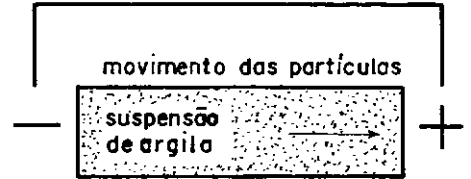
1.1.3 Potencial de Sedimentação ou Migração

O movimento de partículas carregadas (argila, por exemplo) em relação a uma solução, como o que ocorre durante uma sedimentação gravitacional, origina um potencial elétrico como o indicado na Fig. 1d. Tal potencial é causado pela viscosidade da água que contraria o movimento dos cations adsorvidos de argila. Este é o fenômeno inverso da eletroforese.



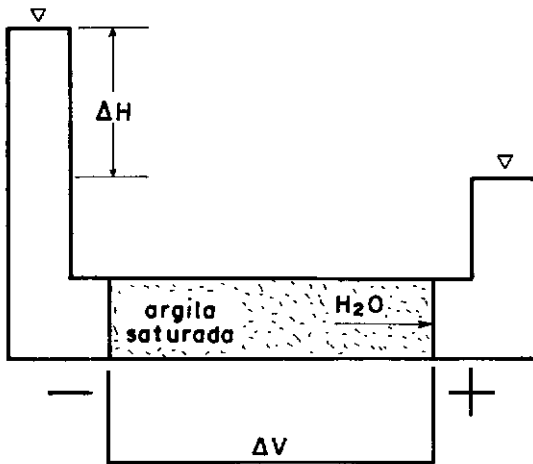
a)

GRADIENTE ELÉTRICO INDUZ
MOVIMENTO DAS PARTÍCULAS DE SOLO



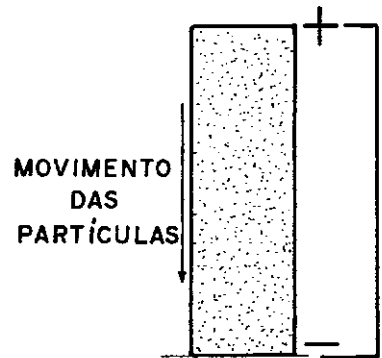
c)

FLUXO D'ÁGUA INDUZ
POTENCIAL ΔV



b)

MOVIMENTO DAS PARTÍ-
CULAS DE SOLO GERA
POTENCIAL ELÉTRICO



d)

FIGURA 1 FENÔMENOS ELETROKINÉTICOS. a) ELETRO-OSMOSE. b) POTENCIAL DE FLUXO. c) ELETRO-FORESE d) POTENCIAL DE MIGRAÇÃO. (SEGUNDO MITCHELL³¹, 1976)

1.1.4 Eletro-osmose

É o mais importante de todos os quatro fenômenos eletrocinéticos em termos de aproveitamento no campo geotécnico. A Fig. 1a ilustra sinteticamente o fenômeno que, no entanto, será melhor detalhado nos itens subsequentes. É o fenômeno inverso do Potencial de Fluxo.

1.2 Os Fenômenos de Fluxo Direto e de Fluxo Conjugado

Afim de tornar mais racional o texto para os leitores que defrontam pela primeira vez com a eletro-osmose, a Tabela 1 fornece certamente elementos esclarecedores. Entende-se por fluxo direto aquele em que o escoamento e o gradiente que o determina são de mesma espécie; por exemplo, o fluxo d'água provocado por um gradiente hidráulico. Fluxo conjugado é aquele em que o escoamento e o gradiente que o determina são de espécies diferentes; por exemplo, o fluxo d'água comandado por um gradiente elétrico.

Logo, a eletro-osmose é um fluxo conjugado, isto é, fluxo d'água comandado por um gradiente elétrico (diferença de potencial).

A osmose, por sua vez, é também um fenômeno de fluxo conjugado onde o fluxo d'água é determinado por gradiente químico (diferença de concentração química) e tem o sentido da menor para a maior concentração.

Qualquer fluxo direto, portanto, pode ser representado pela expressão:

$$J_i = L_{ii} X_i \quad (1)$$

onde,

L_{ii} = coeficiente de condutividade

X_i = gradiente

J_i = fluxo unitário

Os principais fluxos diretos que se conhece são:

Fluxo d'água $q_h = K_h.i_h$ Lei de Darcy (2)

Fluxo calor $q_t = K_t.it$ Lei de Fourier (3)

Fluxo elétrico $I = \sigma.ie$ Lei de Ohm (4)

Fluxo químico $J_d = D.ic$ Lei de Fick (5)

Os fluxos conjugados, semelhantemente, apresentam-se como:

G R A D I E N T E

FLUXO	HIDRÁULICO	TEMPERATURA	E L É T R I C O	QUÍMICO (CONCENTRAÇÃO)
FLUIDO	CONDUÇÃO HIDRÁULICA (LEI DE DARCY)	TERMO-OSMOSE	ELETRO-OSMOSE	OSMOSE
CALOR	TRANSFERÊNCIA ISOTÉRMICA DE CALOR	CONDUÇÃO TÉRMICA (LEI DE FOURIER)	EFEITO PELTIER	EFEITO DUFOUR
CORRENTE	CORRENTE	TERMO ELETRICIDADE	CONDUÇÃO ELÉTRICA (LEI DE OHM)	POTENCIAL DE DIFUSÃO
ION	CORRENTE	EFEITO SORET (DIFUSÃO TÉRMICA DO ELETROLITO)	ELETRO-FORESE	DIFUSÃO (LEI DE FICK)

31

TABELA 1 FENÔMENOS DE FLUXOS DIRETOS E CONJUGADOS (SEGUNDO MITCHELL, 1976)

$$J_i = L_{ij} \cdot X_j \quad (6)$$

onde,

J_i = fluxo unitário

L_{ij} = coeficiente de condutividade conjugado

X_j = gradiente

Ilustrando melhor este último aspecto, um fluxo hidráulico sob gradiente hidráulico, químico e elétrico; numa camada de solo de espessura L ; condutividades K_e (eletro-osmótica), K_h (hidráulica) e K_c (osmótica ou química); onde ΔH é a altura de coluna d'água diferencial, ΔV a diferença de potencial, C_a e C_b as concentrações de sais nos lados opostos da camada de solo ($C_a > C_b$); e considerando-se determinada área A ; seria de acordo com a eq. 6:

$$q_h = - K_h \frac{\Delta H}{L} A + K_c \frac{\log (C_b/C_a)}{L} A - K_e \frac{\Delta V}{L} A \quad (7)$$

1.3 Histórico e Princípios da Eletro-Osmose

O fenômeno da osmose foi observado pela primeira vez pelo cientista francês LA HIRE em 1668. Quase um século e meio depois, F. REUSS concluiu que um líquido pode se deslocar através de um meio poroso qualquer, desde que submetido a um campo elétrico, conceituando assim o fenômeno eletro-osmótico.

Esta conceituação, do ano de 1809, pode ser melhor entendida se aplicarmos um campo elétrico contínuo através de uma massa de solo saturada. Os cations serão atraídos ao catodo (-) e os anions ao anodo (+). Como normalmente em solos argilosos existe a necessidade de cations neutralizarem a eletronegatividade das partículas argilosas, existe maior quantidade de cations que de anions. Tais cations, ao migrarem para o polo negativo, "arrastam" moléculas d'água, causando movimento destas para o catodo. Os anions também participam do mesmo processo, porém, em sentido inverso. Como o fluxo d'água provocado pelos cations é normalmente maior que o fluxo d'água provocado pelos anions, existe uma resultante única na direção do catodo.

Assim, há um "empapamento" na região do catodo e um

"ressecamento" na região do anodo.

Numerosos estudos foram feitos sobre eletro-osmose, encontrando-se aí grandes nomes da física, tais como:

FARADAY, BECQUEREL, HELMHOLTZ e etc.

Quando a eletro-osmose for utilizada visando a drenagem d'água do polo (+) ao polo (-), provocando adensamento sobretudo no polo (+), será chamada de eletro-drenagem.

A eletro-drenagem provoca (desde que o catodo esteja provido de dispositivo para recolher a água que aí chega) o desenvolvimento de poro-pressões negativas na região do anodo. Como o estado de tensões totais no solo não muda, há um consequente aumento das tensões efetivas e então o solo é adensado.

Outra variante da eletro-osmose consiste em aproveitar-se o fluxo d'água no solo e injetar-se solução salina. Este processo será denominado eletro-endurecimento, para melhor diferenciá-lo da eletro-drenagem.

Logo, a eletro-osmose pode abranger duas modalidades em sua aplicação: a eletro-drenagem e o eletro-endurecimento.

Deve-se a LEO CASAGRANDE os primeiros estudos experimentais da eletro-osmose em solos e, sobretudo, as primeiras aplicações práticas, ocorridas na década de 30.

Vale ainda ressaltar que foi L. CASAGRANDE quem observou, experimentalmente, que o coeficiente da permeabilidade 'eletro-osmótica é praticamente constante e igual a $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s/volt/cm}$ para materiais tão diferentes como argila e silte por exemplo, o que torna o processo eletro-osmótico o único capaz de drenar ou injetar fluidos em solos hidraulicamente pouco permeáveis. Como ilustração a este fato, uma argila pouco permeável necessitaria de um gradiente hidráulico de 5000 para que se obtivesse a mesma vazão gerada por um gradiente elétrico de 1 volt/cm.

1.4 Aplicabilidade da Eletro-Osmose na Engenharia Civil

A Fig. 2 fornece indicação da utilidade da eletro-osmose em solos finos, tendo em vista a inutilidade de outros métodos em solos pouco permeáveis.

A aplicabilidade da eletro-osmose através da eletro-dre

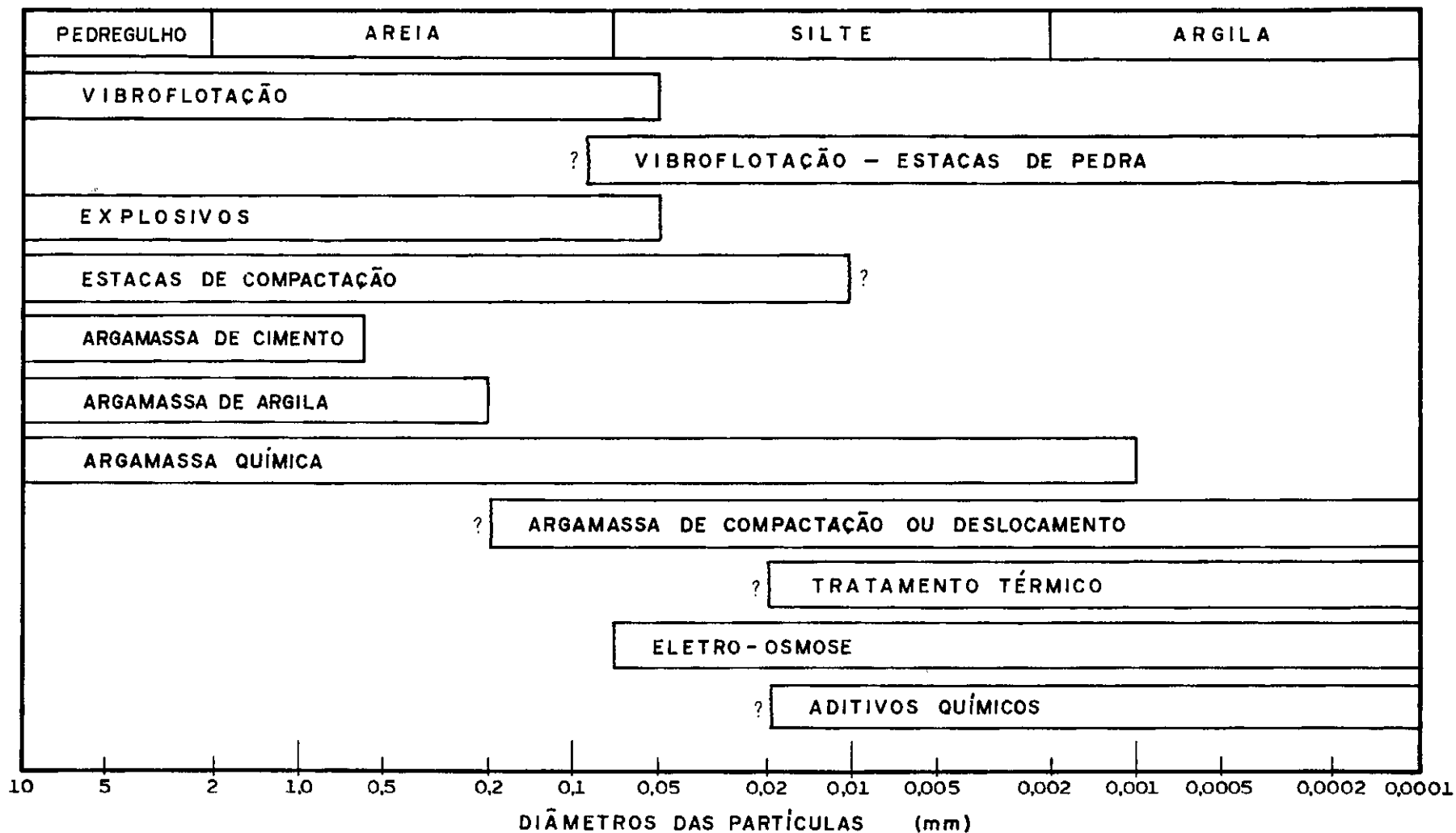


FIGURA 2 DIÂMETRO PARA OS QUAIS DIFERENTES MÉTODOS SÃO APLICÁVEIS (SEGUNDO MITCHELL, 1970)³⁰

nagem e/ou eletro-endurecimento pode ainda ser discri
minada em:

- Redução atrito negativo em estacas já cravadas (tor
nando a estaca um catodo);
- Aumento da resistência lateral em estacas (tornando a
estaca um anodo);
- Redução do atrito durante a cravação de estaca (tor
nando a estaca catodo);
- Estabilização de túneis, cavas de fundação e taludes
(permanentemente ou não dependendo do uso de eletro-
endurecimento ou eletro-drenagem, respectivamente);
- Estabilização de sub-bases ou subleitos de pavimentos;
- Redução no esforço de arrancamento de estruturas metá
licas enterradas (tornando estas estruturas catodo);
- Melhora da capacidade de suporte de terrenos de funda
ção;
- Aceleração dos recalques em solos compressíveis;

A eletro-osmose é, portanto, um meio de que dispõem os
projetistas de fundações para resolução de seus proble
mas. Contudo, a eletro-osmose é uma técnica especial a
ser utilizada em lugares e situações especiais, já que
sua eficiência depende de um certo número de fatores,
tais como:

- Excesso de cations sobre os anions no fluído intersti
cial;
- Quantidade d'água disponível por cation;
- Baixa atividade e baixa capacidade de troca catiônica
dos solos;
- Baixa concentração do fluído intersticial;
- Razão $\frac{K_e}{K_h}$ suficientemente alta para produzirem-se po

ro-pressão negativas, e K_h não muito baixo quando tra
tar-se de eletro-drenagem, já que a compressibilidade
dos solos é função de C_v (coeficiente de compressibi
lidade) mesmo na eletro-drenagem;

- Baixa condutividade elétrica ou alta resistividade
elétrica nas regiões a serem tratadas.

Assim, deve ficar claro que a eletro-osmose tem diversas
limitações, mas que em determinadas ocasiões poderá , a

despeito de crença generalizada de que é algo complexo e extremamente caro, competir com outros métodos de melhoria das condições do subsolo, tudo dependendo da análise de cada caso "de per si". Comprovam isto; as dezenas de aplicação práticas do eletro-osmose já realizadas no âmbito mundial.

1.5 Objetivos e Escopo da Pesquisa

1.5.1 Enfoque Experimental da Pesquisa

O enfoque dado foi essencialmente experimental de laboratório.

Teve-se, para tanto, que desenvolver aparelhagem específica, que poderá ser aperfeiçoada futuramente.

O passo seguinte mais aconselhável seria uma aplicação prática no campo, a fim de sensibilizar mais de perto os construtores e projetistas brasileiros.

1.5.2 Assuntos Tratados

Objetivando conhecer mais de perto o fenômeno eletro-osmótico procurou-se subdividir a pesquisa em duas partes, a saber:

- Eletro-drenagem;
- Eletro-endurecimento.

Em termos de eletro-endurecimento, diversos solos foram tratados com vários produtos químicos, para isto utilizando-se um eletro-permeâmetro especialmente construído para este fim. Nestes solos, determinou-se K_e (coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica) e avaliou-se as mudanças ocorridas nos solos antes e após-tratamento' através dos limites de Atterberg.

Já na eletro-drenagem pesquisou-se, através de ensaios de adensamento em células especificamente construídas ' para estes ensaios, a aplicação de gradiente elétrico e o correspondente recalque das amostras em função da drenagem d'água e diminuição das poro-pressões. As pesquisas não se ativeram somente à compressão primária como também estenderam-se à compressão secundária, procurando esclarecer aspectos não elucidados na bibliografia consultada. Esta foi uma contribuição realmente nova, na

direção do melhor conhecimento do fenômeno eletro - osmótico, por diversas vezes já utilizado na solução de problemas de mecânica dos solos, cumprindo assim o objetivo básico desta pesquisa.

Por outro lado, ao se estudar com certa profundidade o fenômeno da eletro-osmose em solos finos, procurou-se compreender melhor seu mecanismo, para que aplicações práticas no campo possam ser tentadas com expectativas de êxito.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A fim de tornar mais compreensível o fenômeno da eletro-osmose, procurou-se dividir a bibliografia pesquisada em três grupos de assuntos:

- ELETRO-DRENAGEM (Tratamento teórico e ensaios de laboratório)
- ELETRO-ENDURECIMENTO (Tratamento teórico e ensaios de laboratório)
- APLICAÇÕES PRÁTICAS

Deve-se frisar, contudo, que os trabalhos assim englobados não pertencem a determinado grupo e, sim, foram abordados dando ênfase maior a este ou aquele grupo.

Quando as publicações abrangem de maneira mais completa mais de um grupo de assunto são tratadas, nesta revisão, como se fossem pertencentes a cada um dos mesmos.

Observe-se, ainda, que esta revisão não tem o propósito de fazer uma abordagem detalhada e completa de tudo o que até hoje se escreveu sobre eletro-osmose, sendo seu principal objetivo fornecer subsídios para melhor compreensão da pesquisa por nós efetuada, bem como focalizar aspectos importantes do fenômeno eletro-osmótico descritos na bibliografia consultada, principalmente nos trabalhos de mais difícil acesso.

As observações feitas nesta revisão bibliográfica são concernentes ao artigo imediatamente acima das mesmas, constituindo uma pequena contribuição do autor desta Tese à compreensão do que está sendo exposto.

Os números entre parênteses representam o ano em que o artigo foi publicado e toda a bibliografia encontra-se em ordem alfabética, relativa ao sobrenome do primeiro autor, na listagem em anexo.

2.2 Investigações Prévias

2.2.1 Eletro-Drenagem

Na década de 30 numerosos pesquisadores começaram a se interessar pela eletro-osmose. LEO CASAGRANDE já havia, inclusive, patenteado o seu método de aumento da resistência ao cisalhamento dos solos finos através de ele

trodos de alumínio. As pesquisas estavam mais voltadas para a físico-química, quando houve a primeira aplicação prática de eletro-drenagem, estabilizando-se os taludes de uma escavação numa ferrovia em Salzgitter, Alemanha.

Seguindo-se a esta, MCLEAN e ROLFE²⁷ (1945) nos seus ensaios de laboratório concluíram que:

- Passando-se uma corrente elétrica através de solo úmido, o solo torna-se seco no anodo e a água é expelida para o catodo. O ressecamento ocorre principalmente no anodo, com pequenas mudanças de umidade na região do catodo. (anodo polo positivo, catodo polo negativo);
- Quando grandes correntes são empregadas, considerável aquecimento do solo é notado no anodo. Este aquecimento aumenta a velocidade de drenagem da água do solo;
- A quantidade de água conduzida ao catodo é proporcional a quantidade de eletricidade que passa através do solo, até que o anodo esteja seco, depois do que a vazão cai a zero;
- A quantidade d'água expelida para uma certa quantidade de eletricidade é maior para solos arenosos do que para solos argilosos. Existe uma relação linear entre quantidade de eletricidade necessária para expelir 1g de água e a porcentagem de argila do solo;
- A quantidade d'água expelida por coulomb é independente do grau de compactação quando este é relativamente alto.

O mecanismo da eletro-drenagem é também explicado, pelos mesmos autores, sob duas hipóteses:

- Os cations agem como fossem um núcleo para um certo número de moléculas d'água. Quando o cation alcança o eletrodo negativo, ele "dá" sua carga elétrica ao eletrodo e deposita a água que havia carregado consigo.
- A dupla camada difusa dá origem a duas fases. Uma fase de água e outra de partículas negativas de solo.

Quando um campo elétrico é aplicado ao terreno, solo e água tendem a mover-se em duas direções opostas, mas, devido a imobilidade das partículas de solo, somente a água se movimenta.

OBS.: Saliente-se que a segunda conclusão é parcialmente válida. Em empregando-se grandes voltagens os efeitos que daí resultam (aumento da resistividade, perda de energia, trincamento do solo, cavitação da água, etc.) diminuem enormemente a eficiência do processo.

WINTERKORN⁴⁶ (1947) revê a teoria de HELMHOLTZ para o fluxo eletro-osmótico, dizendo que esta dá uma razoável aproximação para o problema, sendo o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico (K_e) uma função basicamente da porosidade. As semelhanças entre termo-osmose e eletro-osmose são também evidenciadas.

OBS.: É bom frisar que a teoria de HELMHOLTZ, aperfeiçoada posteriormente por SMOLUCHOWSKI, foi adaptada para a Mecânica dos Solos em 1946 por SCHAAD e HAEFELI. Estes, neste mesmo ano, introduziram o conceito do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico (K_e), a superposição de fluxos gerados por gradientes hidráulico e elétrico, e a altura de equilíbrio eletro-osmótico (H_e , razão entre os coeficientes de permeabilidade hidráulica e eletro-osmótica multiplicada pela voltagem).

Como se verá depois, nenhuma das teorias existentes sobre eletro-osmose traduz o fenômeno corretamente.

GEUZE et al.²⁰ (1948) desenvolvem uma expressão para determinar K_e num tempo qualquer, já que o valor dado por SCHAAD e HAEFELI é para tempo infinito. Outras observações interessantes são:

- Grandes concentrações de sais prejudicam o processo;
- A redução de umidade por eletrólise é desprezível;
- Os cations tem maior energia de hidratação que os anions, daí o fluxo de cations carregar mais partículas d'água.

OBS.: Esta última observação ficaria mais completa se fosse dito também que, em solos finos (onde a eletro-osmose é viável), a quantidade de cations é muito maior que a de anions pela eletronegatividade das partículas de solo fino.

DAWSON e MC DONALD¹⁴ (1948) falam da existência de um gradiente elétrico ótimo, a partir do qual se desperdiçará eletricidade, além de ocorrência de outros fenômenos indesejáveis, como a excessiva corrosão dos eletrodos. Mostram, ainda, que t_{50} (tempo para 50% do adensamento) é função da altura da camada drenante para amostras de igual C_v (coeficiente de compressibilidade). O uso de corrente alternada não produziu nenhum resultado apreciável.

OBS.: Como era de se esperar, a corrente alternada, invertendo periodicamente o sentido da corrente elétrica, não provoca um fluxo contínuo de cations na direção do catodo, ao contrário da corrente contínua. Os resultados obtidos com corrente alternada são devidos ao aquecimento do solo, segundo os próprios autores.

CASAGRANDE⁷ (1949) faz uma análise completa sobre eletroosmose, dando informação bastante úteis no que concerne a aplicações práticas. As principais considerações desse autor são sumarizadas a seguir:

- K_e é aproximadamente constante para vários solos (5×10^{-5} cm/s/volt/cm);
- As vazões d'água diminuem mesmo com o aporte d'água ao anodo;
- Informações práticas para confecção de eletrodos, especialmente catodos que funcionem com bombeamento mecânico;
- Maneiras de se prever qual o consumo de energia elétrica, em função da disposição e espaçamento de eletrodos, gradientes elétricos, etc;
- Recomendações para geradores (gradiente elétrico máximo de 0,5 volt/cm);
- Como dispor eletrodos em função do tipo da obra, isto

é, em taludes, cavas de fundação, etc;

- Eletro-drenagem é eficiente na correção de recalques desuniformes de fundações, na estabilização temporária de taludes e fundo de escavações, porém só deve ser usada como instrumento complementar no adensamento de solos compressíveis.

OBS.: Esta última afirmação de L. CASAGRANDE seria confirmada posteriormente, onde a resolução matemática da equação do adensamento, para fluxos hidráulico e eletro-osmótico superpostos ou não, mostrou que o tempo em que se darão os recalques é função de C_v (C_v = coeficiente de compressibilidade), fator tempo e altura da camada drenante.

VEY⁴¹ (1949) deduz a equação do adensamento para consolidação por eletro-drenagem e para o potencial de fluxo (quando da passagem de um fluxo hidráulico por um solo, pode-se determinar uma diferença de potencial chamada potencial de fluxo). Ensaaios de laboratório confirmam, em parte, as deduções teóricas. Três importantes fatos decorrentes deste estudo são:

- O uso de eletro-drenagem só é eficaz se somado a carga estática no adensamento;
- O aumento de temperatura do solo pode tornar os resultados do adensamento de laboratório algo incorretos;
- Na medição de K_e pode haver retorno d'água entre o solo e as paredes da célula onde o solo estiver envolto, falseando os resultados.

WANG e VEY⁴⁵ (1958) resumem a tese de doutorado de WANG feita em 1952, onde foi deduzida a equação do adensamento para fluxos hidráulico e eletro-osmótico. Outra parte da pesquisa foi dirigida para a verificação em que a eletro-drenagem não provoca uma situação de "quick-sand". São propostos outros tipos de consolidação, o primeiro por pressões neutras induzidas através da distribuição não uniforme da resistividade, o segundo por curto-circuito através de dois campos elétricos opostos.

SIMON et al.³⁷ (1954) pesquisam a possibilidade de se aumentar a capacidade de suporte de sub-bases de pavimen-

tos em solos siltosos não saturados. Os ensaios de campo realizados mostram que:

- Não há influência do grau de compactação no processo;
- Consumo de energia de laboratório é bem menor que no campo;
- Uso de anodo líquido (cloreto de cálcio) reduz a resistividade;
- A pintura de certas partes dos eletrodos com tinta isolante pode evitar fugas de corrente elétrica.

OBS.: A pergunta que fica, porém, é que apesar de existir consolidação da sub-base tornando-a mais resistente, esta existe até o desligamento de corrente. A seguir haverá um inchamento do solo (que na eletro-drenagem pode ser metade do inchamento para aplicação de cargas estáticas) diminuindo a resistência ao cisalhamento. Neste caso, talvez o tratamento mais eficiente fosse o eletro-endurecimento onde, inclusive, não se produzem recalques.

KONDNER et al²³ (1957), investigam a possibilidade de se usar eletro-drenagem com drenos de areia como meio de serem acelerados os recalques. Definem o fator tempo T_r para drenagem radial superpondo fluxos hidráulico e eletro-osmótico, e apresentam âbacos de fator tempo x porcentagem de adensamento para diversos diâmetros dos drenos de areia. Falam também da existência de uma voltagem residual oposta, onde a voltagem real seria igual à aplicada subtraída da residual. Outras conclusões importantes são:

- Para um dado espaçamento de drenos, a eletro-drenagem somada a cargas estáticas reduz o período de recalques que ocorreria se houvessem apenas cargas estáticas;
- Para um certo recalque, a eletro-drenagem reduz o valor de cargas estáticas necessárias, diminuindo-se a possibilidade da rotura do solo de fundação;
- Para um certo recalque ou para um determinado intervalo de tempo, a eletro-drenagem permite aumento do espaçamento dos drenos de areia.

OBS.: Apesar dos autores acima não terem investigado o aspecto econômico da questão, dois fatos merecem ênfase especial.

Primeiramente, a eletro-drenagem representa uma sobrecarga que acelera recalques mas não provóca possíveis roturas no solo compressível e, em segundo lugar, a existência de uma voltagem residual, como se verá nos parágrafos que se seguem, é parcialmente responsável juntamente com outros fatores pela diminuição de até 50% na voltagem aplicada. Outra especulação possível baseia-se na incerteza de até que ponto esta voltagem residual influenciaria o processo de reversão de corrente.

LOMIZÉ et al.²⁶ (1957) analisam o desenvolvimento da solução matemática para rebaixamento do lençol d'água por bombeamento somado à eletro-drenagem. Exemplificam mostrando o que ocorreu numa cava de fundação na Rússia.

CASAGRANDE⁸ (1957), publica a mais completa revisão bibliográfica sobre eletro-osmose existente até então. Esta revisão tem particular interesse para os que pretendem utilizar este fenômeno eletro-cinético em algum problema prático, pois numerosas aplicações práticas bem como pesquisas de órgãos governamentais norte-americanos não foram publicadas e estão perfeitamente descritas nesta revisão. É um documento obrigatório para os que desejem iniciar ou aprofundar seus conhecimentos.

PIAKOWSKI³⁴ (1957) introduz o coeficiente K_c (coeficiente columétrico) que traduz a relação entre quantidade d'água drenada e a quantidade de eletricidade gasta para transportar tal água. A partir deste coeficiente pode-se determinar qual será a quantidade de energia e quanto tempo levará a drenagem de um determinado volume d'água. A vantagem deste coeficiente, segundo os autores, é que sua determinação é menos complicada que a do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica K_e . Outra informação importante é a existência de uma unidade crítica (função da porcentagem de argila, densidade de

corrente elétrica e concentração da água dos poros), abaixo da qual a eletro-drenagem é impraticável. Acreditam os autores que, abaixo da umidade crítica, a drenagem nos solos ocorra por evaporação, eletrólise da água e migração termo-osmótica e não por eletro-osmose.

CASAGRANDE⁹ (1960) tece considerações sobre decréscimo de umidades, crescimento da resistência ao cisalhamento e tensões n'água intersticial durante a eletro-drenagem. Lembra, ainda, que solos com umidade abaixo do limite de plasticidade não terão fluxo d'água direcional e sim circulação de fluído durante a eletro-drenagem, o que faz com que se procure aplicar tal processo em solos com umidades acima do limite de plasticidade. Outra observação importante é que a aplicação de um gradiente elétrico de 0,5 volt./cm provoca o mesmo recalque que uma carga estática de 1,5 kg/cm² para uma argila de Michigan. São ainda descritas diversas aplicações práticas de eletro-drenagem.

OBS.: O problema de umidade, citado por L. CASAGRANDE, pode ser visto por outro ângulo; quanto maior a umidade, maior será a quantidade d'água por cation, logo maiores vazões podem ser esperadas no catodo, para onde irão os iontes.

CAMBERFORT e CARON⁴ (1961) realizam numerosas experiências em eletro-drenagem e eletro-endurecimento. Com relação às primeiras, uma importantíssima observação foi feita com base em ensaios numa argila de Provins. As vazões, mesmo com os anodos drenados, diminuíam com o tempo. A explicação para o fenômeno veio através do controle das resistividades ao longo das amostras, constatando-se a existência de uma zona desionizada (PH=7) de gradiente elétrico muito baixo, devido a alta resistividade em determinadas seções das amostras ensaiadas. Portanto, esta zona desionizada terá gradiente elétrico muito baixo, gradiente este que comandará o fluxo d'água.

OBS.: A explicação dos autores para diminuição da vazão, mesmo com o aporte de líquido ao anodo, parece ser

a melhor até agora existente, já que a interpretação do fenômeno através da hipótese de variação da concentração do meio, mudanças da dupla camada, etc, cai por terra pois tal fato ocorre mesmo quando se injeta pelo anodo fluídos com diversas concentrações iônicas.

EVANS e LEWIS¹⁸ (1965) formulam cálculos teóricos dos recalques por efeito de eletroforese a partir de modelos reológicos. Comprovam através de ensaios de laboratório as hipóteses teóricas. Um modelo reológico para a teoria de TERZAGHI é também estabelecido.

OBS.: O estado coloidal em que deve encontrar-se a argila, para que se produzam recalques por eletroforese, não é encontrado na prática. Contudo, a eletroforese, segundo diversos autores, é responsável por uma aproximação das partículas do solo na região do anodo. Mas, de acordo com o que se pode depreender da bibliografia consultada, a eletroforese não é fator importante no fenômeno eletro-osmótico.

STATE OF CALIFORNIA, Department of Public Works³⁹ (1967), faz um estudo muito detalhado sobre eletro-drenagem, basicamente voltado para a aceleração de recalques em aterros sobre solos compressíveis, estabilidade de taludes e de fundo de escavações.

As principais conclusões são as seguintes:

- As estacas são o campo mais promissor em virtude do pequeno volume de solo a ser tratado;
- A estabilidade da escavação não é função de variação do teor de umidade e sim da mudança de sentido da força de percolação;
- Os anodos estarão corroídos e deverão ser substituídos quando a amperagem cair de 30%, devendo ter diâmetro mínimo de 6,5cm. Não rodear os catodos com areia e sim envolver as partes perfuradas por tela metálica;
- Os eletrodos poderão ser pintados com tinta isolante onde não se queira eletro-drenagem;
- Poderão haver interrupções de energia para baratear o

processo (em argilas, não em solos siltosos);

- A eletro-drenagem é realmente eficiente em solos siltosos, não devendo ser utilizada para diminuir o teor de umidade apenas, já que tal processo não é suficiente para consolidar solos em breve tempo. A eletro-drenagem é bastante útil na estabilização de taludes e fundo de escavações.

É ainda dado exemplo completo de um projeto de eletro - drenagem para aplicação na fundação de um aterro, com informações sobre custos gerais, gastos com energia elétrica, etc.

OBS.: A eletro-drenagem, tal como o adensamento de TERZAGHI, é função do coeficiente de compressibilidade (C_v) dos solos moles. Assim, sua utilização no adensamento dependerá do uso simultâneo com cargas estáticas e/ou drenos de areia por exemplo. Neste caso, o tempo necessário a se conseguir uma certa porcentagem de recalques poderá ser consideravelmente reduzido.

NICHOLLS e HERBST³³ (1967) mostram aparelhagem, maneiras de conduzi-rem-se testes e marcha de cálculo para predizer-se o grau de consolidação de um solo sob ação de eletro-drenagem somada à cargas estáticas. Outros fatos a serem ressaltados são: as diferenças entre tipos de aparelhagem para drenagem radial, gráficos porcentagem de adensamento radial x fator tempo radial, maneiras para medir-se a carga estática equivalente à carga devida a um gradiente elétrico, gráficos índice de vazios x pressão para drenagem radial ou vertical, cálculo dos custos e indicações de que, para uma disposição hexagonal dos eletrodos, a voltagem efetiva é cerca de 60% de voltagem aplicada.

GRAY e MITCHELL²¹ (1967) introduzem o coeficiente K_i , que traduz a quantidade d'água expelida por unidade de quantidade de energia consumida. Falam, ainda, de quando a eletro-drenagem será efetiva, formulando também maneiras de se prever o consumo de energia elétrica.

CARON⁵ (1968) faz um excelente resumo sobre eletro-dre-

nagem e eletro-endurecimento. São ainda mencionados, com alguns detalhes, três exemplos de aplicação prática.

ESRIG¹⁷ (1968) analisa com profundidade a eletro-drenagem, resolvendo sua equação e mostrando ainda como se desenvolvem as poro-pressões, inclusive no caso de drenagem radial. As principais conclusões do trabalho são as que se seguem:

- O endurecimento eletro-cinético pode ser causado por troca de íons, variação do PH, alteração dos minerais argílicos, deposição de agentes cimentantes e adensamento;
- As pressões neutras desenvolvidas na eletro-osmose são função do gradiente elétrico, geometria dos eletrodos e condições de fronteira dos eletrodos. A poro-pressão não é função direta da geometria dos eletrodos, porém como esta afeta o gradiente, afetará também a poro-pressão;
- A resolução da equação do adensamento para drenagem radial mostra que as poro-pressões podem aumentar ou diminuir dependendo do valor de voltagem em cada ponto, mesmo com catodo e anodo drenados;
- A eletro-drenagem funciona como sobrecarga sem causar rotura do solo.

São ainda dados gráficos de fator tempo x porcentagem de adensamento (drenagem radial inclusive), poro-pressão x distâncias ao anodo e explicações bastante pormenorizadas sobre o desenvolvimento de pressões neutras para diversas condições de fronteira dos eletrodos.

OBS.: As hipóteses simplificadas para resolução da equação do adensamento durante a eletro-osmose, somadas ainda às hipóteses de TERZAGHI, fornecem apenas as indicações do que se obterá no campo.

A eletro-drenagem não causará rotura generalizada do solo, porém se excessivas voltagens forem utilizadas pequenas rachaduras poderão ocorrer na região do anodo.

WAN⁴³ (1970) realiza um volumoso trabalho sobre eletro-drenagem baseado, sobretudo, em numerosos ensaios de labo

ratório. O sumário de suas pesquisas é enfocado a se guir:

- Resolução da equação do adensamento para carregamento estático somado a eletro-osmose, eletro-osmose apenas (de acordo com ESRIG¹⁷, 1968) e eletro-osmose com reversão de corrente. Observa, ainda, que a resolução da equação do adensamento para um carregamento estático triangular coincide com a solução para eletro-osmose apenas (obviamente devido a distribuição triangular de poro-pressão na eletro-drenagem onde anodo e catodo são não drenado e drenado, respectivamente);
- A reversão da corrente (para equalizar os acréscimos de poro-pressão negativa) é ótima para voltagem de valor igual a duas vezes a voltagem inicial;
- A velocidade com que se produz o adensamento é função do excesso de poro-pressão inicial (antes de se aplicar gradiente elétrico) e da voltagem a seguir aplicada;
- O uso combinado de sobrecargas e eletro-osmose reduz o tempo necessário para o excesso de poro-pressão positiva atingir zero;
- A poro-pressão negativa induzida pela eletro-osmose é, na prática, maior que os valores teóricos, supondo permeabilidades hidráulica e eletro-osmótica constantes, ou assumindo os valores de tais permeabilidades ao final de um ciclo de carregamento;
- O coeficiente de compressibilidade com sobrecarga estática é algo maior que o correspondente durante a eletro-osmose;
- As relações resistência ao cisalhamento não drenado x umidade, pressões efetivas x umidade, pressões efetivas x índice de vazios, são idênticas para sobrecargas estáticas e eletro-osmose, dando a validade em dizer-se que a eletro-osmose equivale a uma determinada sobrecarga estática;
- Solos com baixa resistividade merecem atenção (formação de gases, endurecimento de região do anodo, etc) e as densidades máximas de correntes são de 100 micro

ampère/cm² e 20 ampère/m² para campo e laboratório, respectivamente.

- Os principais fatores que afetam o acréscimo da po-ro-pressão negativa são: a relação entre permeabilidades eletro-osmótica e hidráulica, reações químicas, densidade de corrente, corrosão dos eletrodos, estratificação dos solos e cavitação d'água intersticial.

Duas importantes tabelas de cavitação d'água e de consumo de energia são ainda apresentadas, bem como um pequeno resumo de aplicações práticas.

MITCHELL³⁰ (1970) analisa diversos métodos para melhorar a qualidade dos solos de fundação, entre eles a eletro-osmose. Os principais tópicos abordados são:

- As considerações sobre a diversas teorias da eletro-drenagem (nenhuma traduz corretamente o fenômeno da sua complexibilidade) perdem interesse quando se sabe que a vazão é função da permeabilidade e gradiente eletro-osmótico, e que o primeiro fator é aproximadamente constante;
- Como o tempo em que ocorrerá a eletro-drenagem é função do coeficiente de compressibilidade, nos solos siltosos haverá menor gasto de energia;
- A eletro-drenagem reduz a umidade, sendo melhor em argilas inativas, valendo a superposição de fluxos e podendo-se medir a eficiência do processo através do "potencial de fluxo" (STREAMING-POTENTIAL);
- São inúmeros (11) os efeitos químicos paralelos à ação da eletro-drenagem.

São enumeradas ainda as diversas possibilidades de aplicação de eletro-drenagem na Engenharia Civil.

CARON⁶ (1971) aborda de uma forma muito didática a eletro-osmose, sobretudo as diferenças e possibilidades de aplicação da eletro-drenagem e da eletro-consolidação ou eletro-endurecimento. As principais considerações sobre eletro-drenagem são:

- As modificações dos limites de ATTERBERG e modificações na resistência ao cisalhamento dos solos durante

a eletro-drenagem devido a eletro-forese, eletrólise, dissolução dos eletrodos e ionização dos sais solúveis, são desprezíveis se comparadas aos resultados obtidos com a expulsão d'água;

- A diminuição da vazão em virtude da existência de pequenos gradientes, com o consequente aumento pontual da resistividade, coexiste com outra diminuição proveniente da polarização dos eletrodos;
- O tratamento ligar-parar-religar geradores é aconselhável, já que a eletro-drenagem continua a se manifestar por algum tempo após o desligamento da corrente elétrica, podendo-se então utilizar energia nos períodos do dia em que esta foi mais propícia e cortá-la nos horários onde não há expediente;
- Existe para cada problema uma voltagem ótima, além disso se a vazão é função do menor gradiente não adianta ir muito além de certo limite (além de outros problemas correlatos como aquecimento, gases, etc.);
- O uso de pequenos gradientes pode ser compensado pelo aumento do número de pontos de recolhimento d'água;
- O consumo de energia pode ser calculado, "a priori", multiplicando-se o gradiente pela densidade de corrente e pelo tempo de duração da operação.

LEWIS & HUMPHESON²⁵ (1973) utilizam o método dos elementos finitos para análise do rebaixamento de lençol d'água através da eletro-drenagem somada ou não a poços de sucção convencionais.

ROBNETT³⁵ (1973) qualifica os diversos métodos para melhorar a capacidade de suporte de subleitos de aeroportos, entre eles a eletro-drenagem e o eletro-endurecimento. Ambos são considerados não convenientes face a uma série de requisitos, sendo eleitos os métodos mais adequados; o uso de cal, argamassas e cravação de estacas, em ordem preferencial, respectivamente.

RODERICK³⁶ (1975) faz experiências de laboratório para verificação do efeito de eletro-drenagem no arrancamento de objetos metálicos enterrados em sedimentos moles, concluindo que a eletro-drenagem pode vir a ser efetiva

em aplicações práticas, sendo o tempo de arranque função da configuração dos eletrodos.

OBS.: A energia elétrica consumida não é diretamente ligada à configuração dos eletrodos e sim ao gradiente elétrico. Porém, como este último depende do primeiro (vide tempo de arrancamento), confirma-se o fato de que a configuração dos eletrodos é importante na eletro-osmose.

MITCHELL³¹ (1976) dedica um capítulo inteiro de seu livro "Fundamentals of Soil Behavior" aos fenômenos de condução pormenorizando:

- Fluxos superpostos;
- Analogias entre os fenômenos de condução;
- Análise comparativa dos fluxos e suas importâncias;
- Correlações entre permeabilidade hidráulica e eletro-osmótica;
- Conceitos sobre os quatro fenômenos eletrocinéticos;
- Estudo sobre as quatro teorias sobre eletro-osmose (Helmholtz-Smoluchowski, Schmid, Spiegler e Hidratação Iônica);
- Previsão de quando será efetiva a eletro-drenagem sem se basear em nenhuma teoria específica (argila inativas, alta umidade, poucos sais na água intersticial, plasticidade baixa, relação entre permeabilidade eletro-osmótica e permeabilidade hidráulica não muito alta, etc);
- Idem anterior, com base no potencial de fluxo, ou seja,

$$\frac{q_h}{I} \quad \Delta H=0 = - \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad I=0 \quad (8)$$

onde,

I = intensidade da corrente elétrica

q_h = vazão hidráulica

ΔV = gradiente elétrico

Δ_h = gradiente hidráulico

Fazendo um ensaio de permeabilidade convencional (aplicando-se Δ_h e medindo-se q_h) com o auxílio de voltímetro

trô e amperímetro, mede-se ΔV e I. Para as unidades abaixo tem-se que:

$$\frac{Q_h}{I} \times \text{galões} \times \text{hora/ampère} = 0,0094 \frac{\text{milivolts}}{\text{ampère}} \times \frac{\Delta V}{\Delta H}$$

Obtendo-se a eficiência do processo em que o termo $\frac{\Delta V}{\Delta H}$ é o potencial de fluxo;

- Previsão dos gastos de energia;
- Resolução das equações de eletro-drenagem para fluxos radiais ou não;
- Descrição dos fenômenos eletroquímicos paralelos à passagem de corrente elétrica contínua no solo (cavitação, aumento da resistividade, mudanças no PH, difusão de íons, etc).

WAN & MITCHELL⁴⁴ (1976) resumem a tese de doutoramento de WAN, que se encontra já registrada nesta revisão bibliográfica.

2.2.2 Eletro-Endurecimento

Como já foi dito no início do item anterior, LEO CASA GRANDE em 1935 patenteou o processo de eletro-endurecimento através da dissolução de anodos de alumínio no interior de um solo. A Alemanha era o local onde mais se pesquisava nesta época, com trabalhos principalmente voltados para o aumento do atrito positivo em estacas metálicas que funcionavam como anodos.

ENDELL & HOFFMANN¹⁵ (1936) fazem experimentos usando anodos de alumínio e catodos de cobre em blocos de argila e em estacas (modelo reduzido). Constatam que o aumento do ângulo de atrito dos solos e da sua consequente resistência ao cisalhamento é considerável. Notam também que os limites de ATTERBERG decrescem e que o precipitado encontrado cimentando a argila era bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$).

LEO CASAGRANDE em 1939 (vide bibliografia 39.2 em CASA-GRANDE⁸ 1957) sumariza o endurecimento irreversível de argilas conseguido com eletrodos de alumínio da seguinte

te forma:

- A umidade é apreciável e irreversivelmente reduzida;
- Amostras tratadas ficaram submersas durante 3 anos sem inchamento;
- A forma da curva (após-tratamento) índice de vazios x log. pressão efetiva é similar a de uma argila pré-adensada;
- Os aluminatos depositados aumentam a resistência ao cisalhamento;
- A quantidade de energia envolvida no tratamento de largas massas de solo é excessiva. Contudo, tratando-se de pequenos volumes (estacas ou camadas pouco espessas) o método é realmente econômico.

OBS.: A terceira afirmativa confirma uma das causas do pré-adensamento, que é a cimentação.

SOLETANCHE³⁸ (1953) faz uso de anodos líquidos, injetando cloreto e nitrato de amônia durante uma bem sucedida aplicação de eletro-drenagem, objetivando com estas injeções diminuir a resistividade. De fato, houve diminuição da resistividade com o consequente aumento de intensidade da corrente elétrica, contudo, sem apreciável mudança nas vazões hidráulicas.

MURAYAMA & MISE³² (1953) realizam experiências de laboratório e dão excelente tratamento teórico para o eletroendurecimento de 3 tipos de argila com eletrodos de alumínio, sendo suas principais conclusões:

- A principal zona "endurecida" é a de PH=7;
- Argilas de PH ácido não dão bons resultados;
- Na zona de cimentação a permeabilidade cai drasticamente, reduzindo a eficiência do processo;
- A posição da zona de cimentação pode ser controlada pela adição controlada de sais;
- A argila assim tratada é quimicamente estável, e menos permeável ainda.

Neste mesmo ano KARPOFF (vide bibliografia 53.7 em CA SAGRANDE⁸ 1957) constata que o tratamento eletro-químico (eletro-endurecimento) do solo permite não só redução no teor de umidade como também mudanças definitivas nas

propriedades físico-químicas do material e possíveis mudanças na estrutura das partículas argilosas. Testes elaborados indicam ainda que, em muitos casos, é possível obter-se grandes aumentos na resistência dos solos, maiores que os provocados pela eletro-drenagem.

CASAGRANDE⁸ (1957), como já largamente mencionado neste texto, contem detalhes e comentários de várias outras bibliografias relativas a eletro-endurecimento.

BALLY & ANTONESCU¹ (1961), preparando as bases teóricas para posterior aplicação de eletro-endurecimento em minas da Romênia, realizam diversos ensaios de laboratório estabelecendo valores de: resistividade, coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico, consumo específico de eletricidade para numerosos solos, e novas hipóteses para a teoria de HELMHOLTZ.

CAMBERFORT & CARON⁴ (1961) injetam diversos sais em amostra da argila de Provins, obtendo aumentos da resistência ao cisalhamento e limites de ATTERBERG. Analogamente ao que ocorre durante a eletro-drenagem, existe uma "barreira" de gradiente elétrico muito baixo comandando o fluxo d'água. Neste caso, a zona de "barreira" se dará em regiões básicas. Concluem, ainda, que a injeção de sais pelo anodo é muito mais econômica do que deixar dissolver eletrodos como fez L. CASAGRANDE. Além do que, a resistividade na região dos anodos líquidos é bem menor que para anodos não líquidos, favorecendo uma maior intensidade de corrente elétrica contínua, logo menor consumo de energia elétrica para uma mesma voltagem.

ESRIG & GEMEINHARDT¹⁶ (1967) tratam do eletro-endurecimento de uma argila ilítica e suas conclusões principais são as seguintes (usando eletrodos drenados e cloreto de cálcio):

- A resistência ao cisalhamento (não drenada), os limites de ATTERBERG e o PH, crescem mais depressa no catodo que no anodo, ao contrário da eletro-drenagem;
- O crescimento de PH é acompanhado pelo aumento nos limites de ATTERBERG. O aumento em tais limites é, por sua vez, acompanhado de um aumento na resistência ao

cisalhamento não drenada e a umidade não se altera (amostras saturadas);

- O limite de contração pode variar não devido a mudanças na estrutura do solo e sim pela formação de cristais de sais hidratados;
- ENDELL & HOFFMANN¹⁵ (1936) diziam que o endurecimento era função de trocas iônicas, redução da umidade e mudanças na estrutura. Calculando-se o valor da resistência não drenada antes e após-tratamento para a mesma umidade, viu-se que a resistência não drenada aumentará para esta umidade. Calculando-se o valor da resistência não drenada com base nos limites liquidez, viu-se que tal valor era igual ao de laboratório. Logo, não há cimentação. Finalmente, Raios-X não mostraram mudanças na estrutura. Assim, a variação da resistência não drenada é função apenas da umidade e troca iônica;
- A troca iônica pode dar-se com os íons do próprio meio sem necessitar-se de adição de sal. Para tanto, uma excitação de tais íons com fluxo d'água ou corrente alternada pode ser suficiente.

CARON⁵ (1968) faz excelente dissertação sobre eletro-drenagem e eletro-endurecimento, apontando de forma adequada as principais características de cada processo.

GRAY²² (1970) faz um completo estudo sobre eletro-endurecimento, destacando-se a correlação entre aumento de resistência com as variações nos limites de ATTERBERG e o uso de eletrodos de alumínio (em virtude de sua capacidade de modificar a mineralogia do solo), como por exemplo, transformando montmorilonita em pseudo-clorita e estabilizando o PH. Assim, GRAY conclui que:

- Para uma mesma corrente, as amostras com maior umidade têm maior porcentagem de alumínio;
- Para uma mesma umidade, quanto maior a quantidade de corrente elétrica contínua maior será a porcentagem de alumínio;
- Para amostras estabilizadas (PH não crescendo tanto no catodo em função da adição de NaCl na região do mesmo)

a velocidade d'água é maior e o mesmo ocorre para a quantidade de alumínio transferido;

- Houve transformações de montmorilonita em: clorita;
- O Limite de Liquidez em algumas amostras aumentou, não alterou-se e diminuiu, dependendo do tipo de solo. A resistência não drenada aumentou sempre, exceto em algumas amostras no período logo após o início do tratamento. Porém, ao final do processo, a resistência aumentou em todas as amostras;
- Usar anodos líquidos é garantia de eficiência superior a eletrodos de alumínio;
- Os custos envolvidos sugerem eletro-endurecimento apenas para pequenos volumes de solo (estacas, sapatas, etc.).

CARON⁶ (1971) sustenta que para eletro-endurecimento:

- Não há íon universal (exemplificando as preferências mundiais);
- O aumento da resistência se dá para umidade constante;
- O índice de vazios diminui pois o sal absorvido é matéria seca;
- A escolha de sal deve levar em consideração o grande aumento que terá a intensidade de corrente elétrica;
- Uma variante do processo de eletro-endurecimento consiste em aquecer a argila ("cozer a argila") fissurando-a e posteriormente injetando soluções pelas fissuras.

OBS.: O "cozimento" necessita que o lençol d'água esteja abaixo da zona tratada.

MITCHELL³¹ (1976) cita os diversos efeitos eletro-químicos paralelos à passagem de corrente elétrica nos solos, dizendo que alguns serão benéficos (mudanças na plasticidade e resistência) e outros não (aquecimento, gases gerados nos eletrodos) ao processo. Referindo-se a BJERRUM et al.² (1967), diz que o aumento da resistência não é só creditado à diminuição da umidade, também os limites de ATTERBERG mudaram em função do tratamento (aumentaram). Logo, o adensamento sozinho não tem efeito em tais limites; mudanças na mineralogia, características das partículas e/ou solução dos poros são os respon

sáveis pela variação nos limites em questão. Exemplificações para: variação do PH nos eletrodos, os fenômenos daí advindos e transformação de argilo-minerais em outros argilo-minerais de características modificadas, são também fornecidos.

2.2.3 Aplicações Práticas

As aplicações precursoras da década de 30 e trabalhos práticos posteriores, principalmente os de LEO CASAGRANDE, encontram-se em CASAGRANDE⁸ (1957).

SOLETANCHE³⁸ (1953) utiliza eletro-drenagem e também eletro-endurecimento nos taludes de uma escavação para uma estação de tratamento de esgotos na cidade francesa de Bordeaux, obtendo pleno êxito.

TAMEZ & FLAMAND⁴⁰ (1960) usam eletro-drenagem somada a bombeamento mecânico para rebaixar o lençol d'água na Cidade do México, fazendo que o peso específico submerso passe a úmido, permitindo que esta sobrecarga assim criada evite inchamentos e recalques imprevisíveis numa fundação flutuante.

BALLY & ANTONESCU¹ (1961) utilizam eletro-endurecimento, somado a ar comprimido, na introdução de silicatos de sódio em seções instáveis de minas romenas. As condições de aplicabilidade foram ainda melhoradas introduzindo-se sucção no catodo e inversão periódica de corrente elétrica. Os resultados e o custo deste tratamento foram plenamente aceitáveis.

CORREA¹² (1963) aplica eletro-drenagem como auxílio a um rebaixamento na Cidade do México, não obtendo resultado devido à existência de lentes de areia e formação de lâmina d'água no fundo da escavação. Tais fenômenos prejudicam qualquer tipo de rebaixamento o que exime a eletro-drenagem de responsabilidade direta sobre o fracasso no rebaixamento d'água.

FETZER¹⁹ (1967) relata a recuperação urgente dos taludes da barragem de WEST BRANCH nos U.S.A., sob a consultoria de LEO CASAGRANDE. Evitou-se o prejuízo que adviria caso não se obtivesse uma rápida solução para o problema.

BJERRUM et al.² (1967) dão a mais completa descrição de aplicação prática escrita até hoje, quando relatam minuciosamente os detalhes de como modificar a resistência ao cisalhamento não drenada de uma argila norueguesa através da eletro-drenagem, visando melhorar as condições de fundação de uma estação de esgotos.

BOZOUK & LABRECQUE³ (1967) aplicam eletro-drenagem na diminuição do atrito negativo em estacas, conseguindo resultados bastante satisfatórios.

CHAPPEL E BURTON¹⁰ (1975) conseguem êxito na estabilização dos taludes de um aterro num cais de Bangkok, TAILÂNDIA.

Dezenas de outras aplicações prática foram feitas com sucesso, contudo, as bibliografias acima listadas são as que melhor expõem os detalhes construtivos.

CAPÍTULO III

ELETRO-ENDURECIMENTO E MEDIÇÃO DA PERMEABILIDADE
ELETRO-OSMÓTICA

3.1 Introdução

Mudanças irreversíveis nas propriedades físico-químicas dos minerais do solo, podem ser conseguidas injetando-se soluções em seu interior. Em solos pouco permeáveis torna-se impossível injetar um produto químico pelos métodos convencionais. Como já fora anteriormente dito, o eletro-endurecimento pode solucionar este problema, razão pela qual decidiu-se observar mais de perto esta técnica, em laboratório.

Programou-se uma pesquisa que compreendeu o seguinte:

- Injeção de vários produtos químicos em diversos tipos de solos, com o auxílio da eletro-osmose;
- Verificação das mudanças ocorridas nos solos ensaiados, através das alterações nos limites de Atterberg;
- Medição do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica nos solos ensaiados;
- Projeto e construção de aparelhagem que permitisse o cumprimento dos objetivos acima mencionados.

Os objetivos dessa pesquisa, e a metodologia seguida, encontram justificativa nas considerações seguintes:

- a) Injeção de diversos produtos químicos em diversos tipos de solos, como auxílio da eletro-osmose.
 - É bastante óbvia a afirmação de Caron⁶ (1971), de que não há íon universal, isto é, cada tipo de solo melhor reage com determinada solução química; daí o uso de diversos produtos químicos em vários solos.
- b) Verificação das mudanças ocorridas nos solos ensaiados através da modificação ocorrida nos limites de Atterberg, em relação aos do solo não tratado.
 - Por razões de maior simplicidade não procurou-se detectar os efeitos do tratamento eletro-osmótico pela variação dos parâmetros de resistência, mas tão somente pela variação dos limites de Atterberg.
- c) Medição de coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica dos solos ensaiados.
 - De grande importância para aplicações práticas, o coeficiente K_e , medido para diversos tipos de solos, fornece informações valiosas sobre o fenômeno eletro-osmótico.

d) Projeto e construção de aparelhagem específica.

- Era necessário projetar e construir uma aparelhagem ' que permitisse a injeção dos produtos químicos eletricamente. Partindo de um esboço feito pelo professor J. K. Mitchell em 1973, quando de sua estada na COPPE/UFRJ, foi concebido um equipamento que mostrou ser de bastante utilidade para a realização dos ensaios programados.

Outrossim, alguns ensaios foram realizados com amostras deformadas, outros com amostras indeformadas. Isto foi propositalmente feito pois, como a determinação de K_e seria função dos valores de K_h , seria interessante observar qual o comportamento de permeabilidade eletro-osmótica quando da variação da permeabilidade hidráulica. Além disso, as disponibilidades de solos para ensaios e as dificuldades na moldagem de corpos de prova indeformados na célula eletro-osmótica, também forçaram a realização de um maior número de ensaios com corpos de prova deformados.

3.2 Aparelhagem

3.2.1 Concepção

A aparelhagem foi concebida a partir, como já foi dito anteriormente, de um esboço cuja finalidade era apenas didática, seja a de visualizar a passagem de corrente elétrica por um solo.

O esboço inicial foi modificado de forma a permitir não só a injeção de produtos químicos como também medição de permeabilidades hidráulica e eletro-osmótica.

3.2.2 Construção

O "eletro-permeâmetro", como foi denominada a aparelhagem, foi construído nas oficinas da firma Ronald Top Ltda, do Rio de Janeiro, com algumas modificações feitas no laboratório de solos da COPPE/UFRJ.

3.2.3 O Eletro-Permeâmetro

A Foto 1 mostra uma vista geral do conjunto. Temos

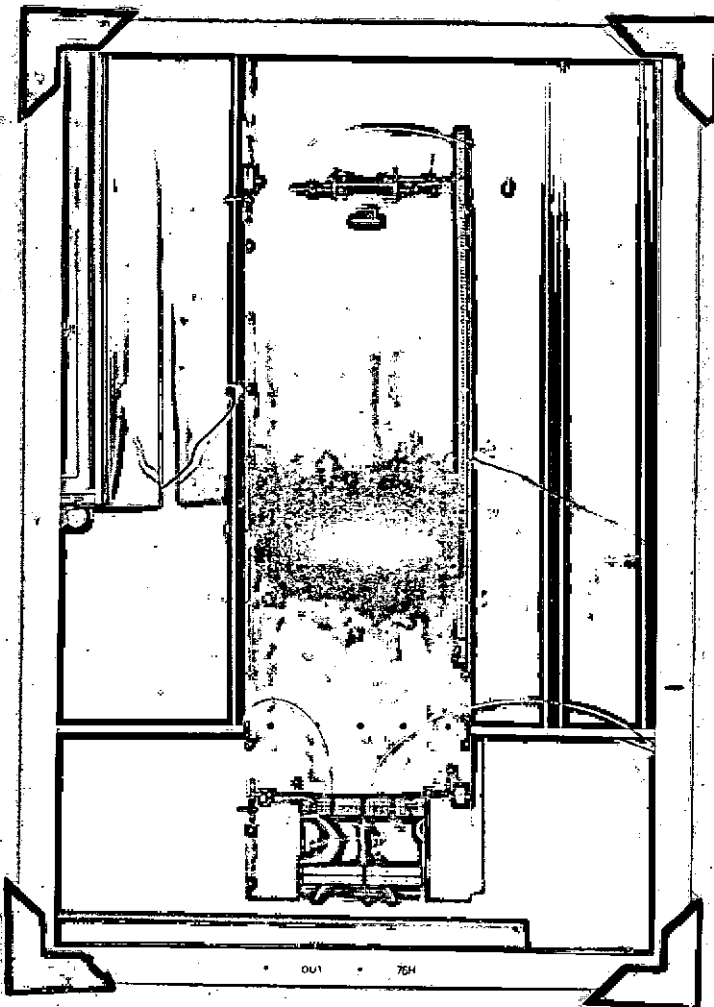


FOTO 1 - VISTA GERAL DO ELETRO-PERMEÂMETRO

na parte superior um reservatório d'água em acrílico. A melhor maneira de "colar" as paredes do reservatório foi com o uso de clorofórmio, já que com este tipo de produto as juntas suportam as pressões d'água, fato que não ocorreu quando inicialmente usou-se cola tipo "Araldite". O reservatório, com dimensões aproximadas de 35cm x 24cm x 11cm, tem 4 saídas e entradas na base. Saída à esquerda, que a seguir se bifurca através de torneira, permitindo que o fluído do reservatório possa ser jogado fora ou vá para a célula eletro-osmótica, além de fazer desaeração da parte superior do sistema. Saída na parte central, conectada a um tubo galvanizado que servirá de "ladrão". Entrada, também na parte central, ligada ao sistema de fornecimento d'água do laboratório de mecânica dos solos. Saída à direita (provida de torneira), que se liga a tubulação vertical, permitindo chegada d'água na parte à direita da célula eletro-osmótica. A Fig. 3 mostra um esquema do funcionamento do conjunto.

Com o dispositivo assim determinado, pode-se proceder a ensaios de permeabilidade tanto de carga constante como carga variável, além dos ensaios de determinação de K_e e injeção de produtos químicos.

A parte inferior do equipamento, como pode ser vistas nas Fotos 2 e 3, é composta de uma célula com 18cm de largura. Esta célula é formada por 2 reservatórios e um cilindro de acrílico.

O cilindro de acrílico tem ponta biselada (para ajudar na cravação em amostras indeformadas), sendo seu diâmetro externo de 5,5cm, comprimento de 10cm e diâmetro interno de 3,8cm. O reservatório da direita é móvel, Fotos 4 e 5, permitindo que o cilindro possa ser retirado a qualquer tempo. Os reservatórios são ainda providos de purgadores e de "O-Rings" para expulsão de gases e melhor vedação da célula, respectivamente, sendo o conjunto sustentado por duas alças metálicas.

A Foto 6, mostra o cilindro com seus componentes, que são:

- (1) pedra porosa

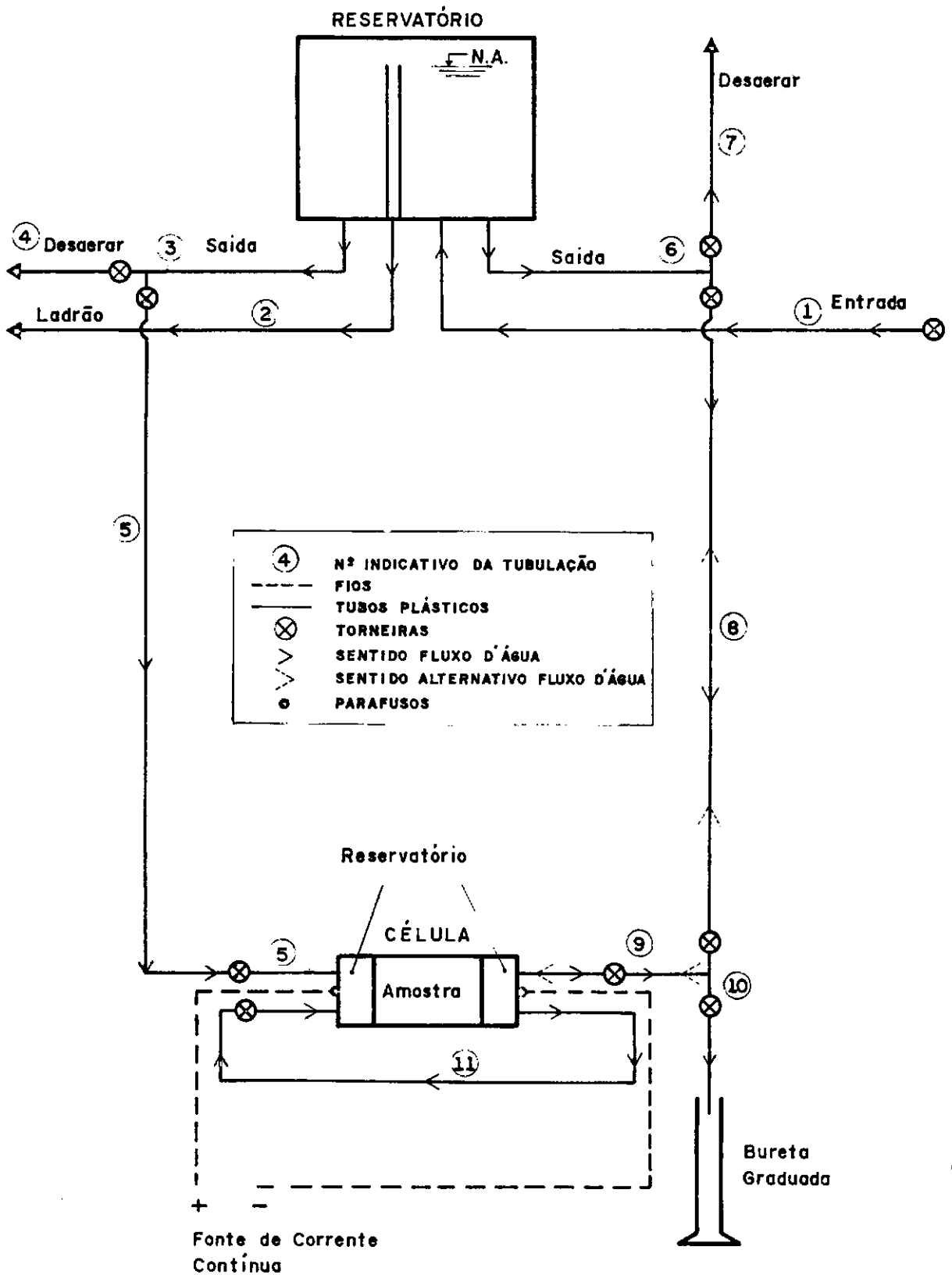


FIGURA 3 ESQUEMA DO ELETRO-PERMEÂMETRO

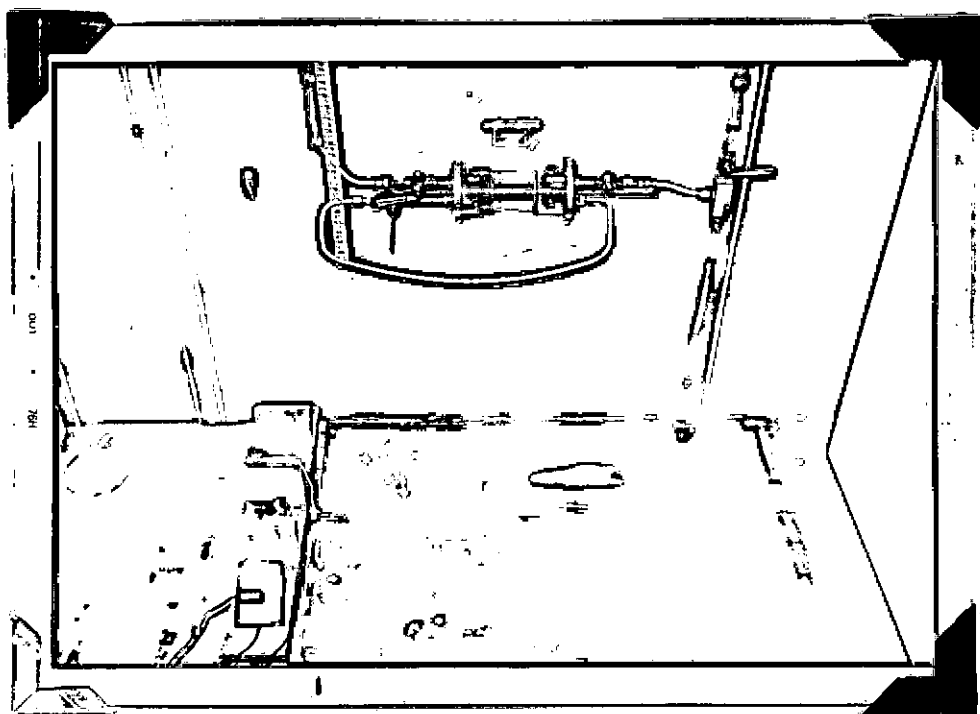


FOTO 2 - VISTA DA CÉLULA DO ELETRO-PERMEÂMETRO

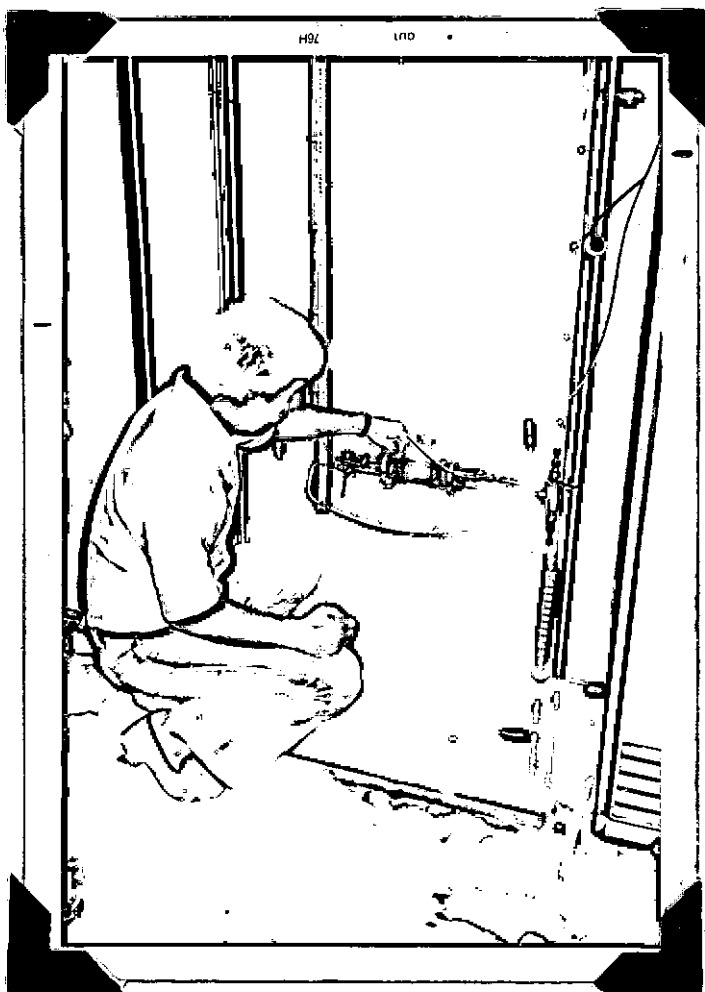


FOTO 3 - VISTA DA CÉLULA DO ELETRO-PERMEÂMETRO

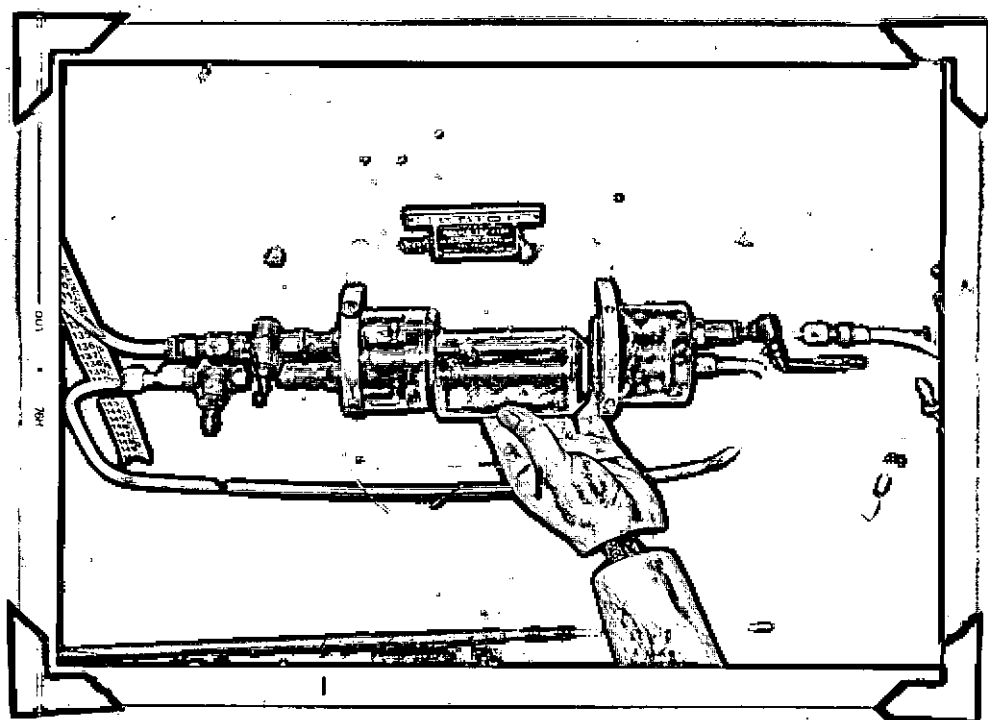


FOTO 4 - DETALHES DA CÉLULA DO ELETRO-PERMEÂMETRO

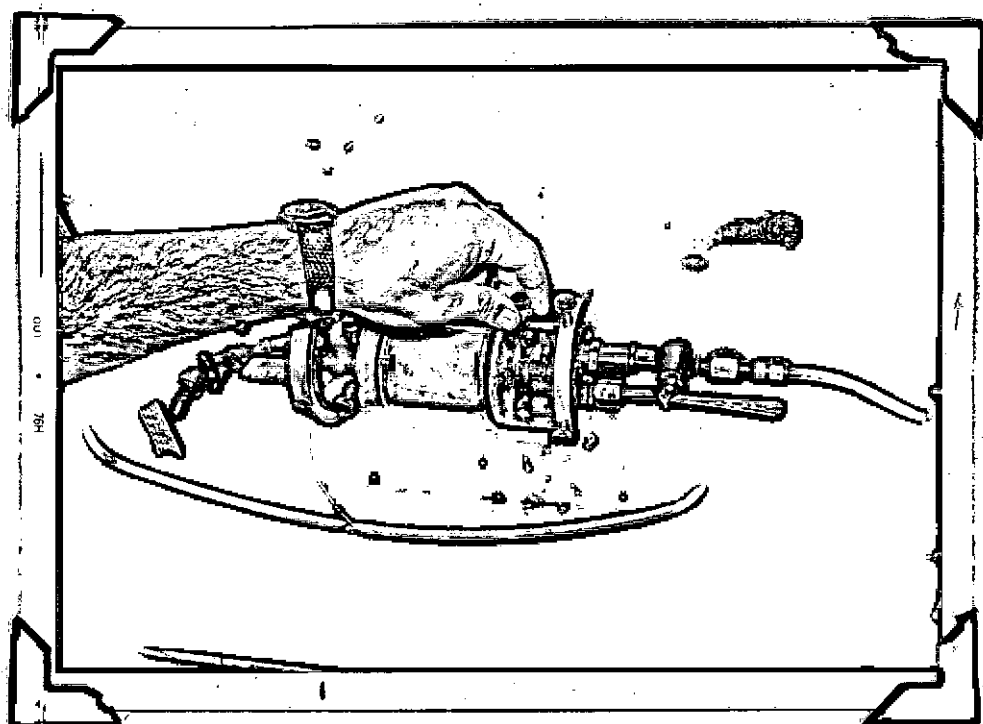


FOTO 5 - DETALHES DA CÉLULA DO ELETRO-PERMEÂMETRO

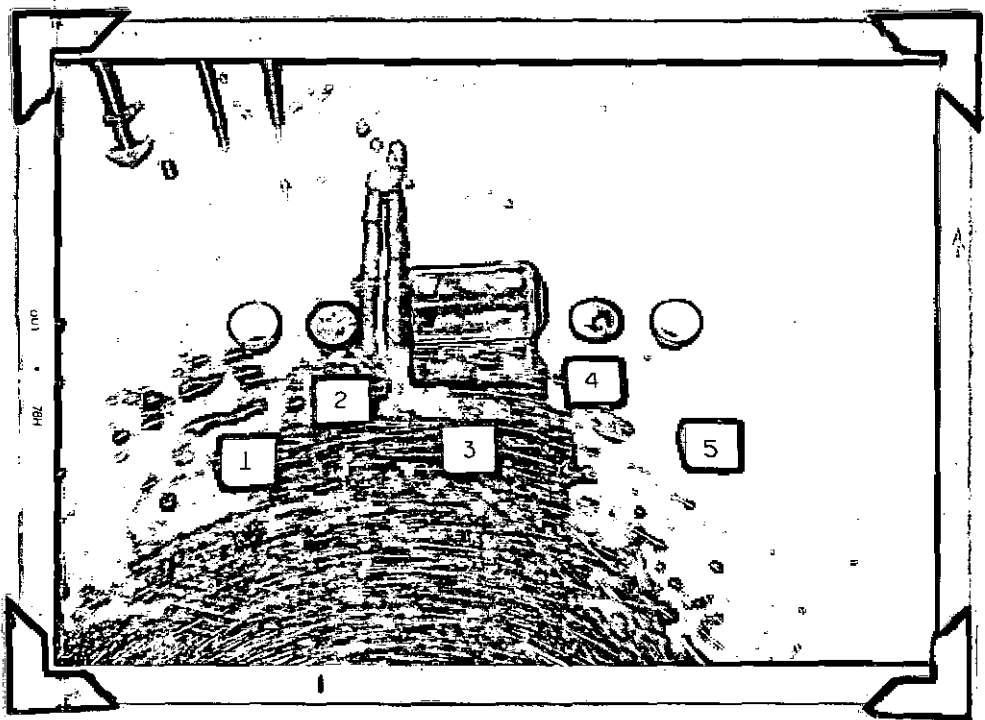


FOTO 6 - CILINDRO BISELADO E SEUS COMPONENTES

- (2) papel filtro
- (3) cilindro com amostra em seu interior
- (4) papel filtro
- (5) pedra porosa

O eletro-permeâmetro tem, ainda, saída para bureta graduada onde as vazões resultantes de ensaios de permeabilidade podem ser anotadas. Convém lembrar que as torneiras do equipamento podem, se convenientemente dispostas, fazer inúmeros caminhos alternativos para fluxos d'água ou produtos químicos, dando uma maleabilidade bastante importante para execução dos vários tipos de ensaios, como mostrado adiante.

O uso de acrílico no equipamento, deve-se ao fato de ser o mesmo elemento isolante, evitando curto-circuito ou fuga de corrente elétrica.

Os eletrodos são placas perfuradas de ferro, situadas na parte internados reservatórios, ligadas ao exterior da célula por um parafuso. Desta forma, temos a seguinte configuração:

fonte → fio → parafuso (anodo) → placa perfurada → água (ou produto químico) → pedra porosa → papel filtro → amostra de solo → papel filtro → pedra porosa → água (ou produto químico) → placa perfurada → parafuso (catodo) → fio → fonte

Adotamos este tipo de dispositivo, recomendado pelo prof. Mitchell e conhecido como anodo e catodo líquidos, visto dar ao processo eletro-osmótico eficiência superior a de eletrodos diretamente em contato com o solo. Quanto à pedra porosa e o papel filtro, suas funções são bem conhecidas.

A fonte de corrente elétrica contínua é da marca Kepco (U.S.A.) com capacidade de até 50 volts.

3.3 Metodologia dos Ensaios Realizados (em ordem cronológica)

3.3.1 Permeabilidade Hidráulica

Estes ensaios foram executados tendo em vista que a permeabilidade eletro-osmótica seria determinada poste

riormente com base nos mesmos.

Face à fração argilosa dos materiais ensaiados, os ensaio foram os de carga variável. Neste ponto, é bom frisar, que para materiais de permeabilidade hidráulica muito baixa a aparelhagem construída não é adequada, já que a altura de coluna d'água (cerca de 2m) não é suficiente para que haja percolação em pouco tempo. Deste modo, seria necessário modificar o equipamento para que a água pudesse percolar sob pressão, fazendo-se alterações nas tubulações e no sistema de torneiras e reservatório, no caso de argilas muito impermeáveis.

O ensaio em questão é composto das seguintes fases:

- a) Colocação de amostra no cilindro de acrílico, tendo-se o cuidado de passar vaselina nas paredes internas do cilindro, a fim de evitar percolação de fluídos que não pelo interior da amostra de solo. As amostras indeformadas são cuidadosamente extraídas de blocos também indeformados, e as deformadas são compactadas no interior do cilindro com ajuda de um pequeno soquete. O cilindro deve ser pesado com e sem solo, determinando-se também a umidade inicial do material a ser ensaiado.
- b) Colocação do cilindro no interior da célula eletro-osmótica.
- c) Enchimento de reservatório, abrindo-se a torneira da tubulação (1), mantendo-se as demais torneiras fechadas.
- d) Abertura das torneiras do início das tubulações (4) e (7) para desaeração.
- e) Abertura das torneiras das tubulações (5), (8) e (9), fechando-se as torneiras das tubulações (4), (6) e (7).
- f) Abertura dos purgadores dos reservatórios da célula eletro-osmótica.
- g) Fechamento dos purgadores do item f, quando o sistema estiver já desaerado.
- h) Fechamento da torneira inferior da tubulação (8) e abertura da torneira da tubulação (10).
- i) Percolação até que as vazões medidas na bureta gra

- duada tornem-se constantes (amostra de solo saturada).
- j) Fechamento da torneira superior da tubulação (5), e medição de determinada queda de altura com o tempo.
- l) Repetição de todo o processo (pelo menos 3 vezes), à exceção dos itens a e b acima.
- m) Cálculo de K_h pela fórmula:

$$K_{20} = 2,303 \frac{a}{A} \frac{L}{t} \left(\log \frac{h_o}{h_f} \right) RT \quad (9)$$

onde,

a = área do tubo ($0,14\text{cm}^2$)

A = área da amostra ($10,12\text{cm}^2$)

L = comprimento da amostra ($9,0\text{cm}$)

t = tempo decorrido para que ocorra determinada que
da de carga hidráulica (s)

h_o = carga inicial (geralmente cerca de 150cm)

h_f = carga final (geralmente cerca de 50cm)

$$RT = \frac{u_T}{u_{20}} = \frac{\text{viscosidade da água a } T^\circ \text{ C}}{\text{viscosidade da água a } 20^\circ \text{ C}}$$

e cálculo do índice de vazios inicial das amostras
ensaiadas por:

$$e = \frac{V - V_s}{V_s} \quad (10)$$

onde,

V = volume inicial total da amostra ($91,10\text{cm}^3$)

$$V_s = \text{volume dos sólidos} = \frac{W_s}{\delta g} \quad (11)$$

$$W_s = \text{peso solo seco} = \frac{W_h}{1 + w} \quad (12)$$

δg = densidade dos grãos

W_h = peso solo úmido

w = umidade

A temperatura d'água é medida na bureta.

3.3.2 Permeabilidade Eletro-osmótica

Tendo-se a Fig. 3 como referência, pode-se ver que uma corrente elétrica contínua pelo interior do solo provo^{ca}rá chegada d'água ao catodo. Estando a torneira da tubulação (10) fechada, tal água terá que ascender pela tubulação (8) atingindo a uma determinada altura (H_e),

cuja dedução, de acordo com Geuze et al.²⁰ (1948), é mostrada a seguir.

O gradiente elétrico causa um fluxo de:

$$dq_e = K_e \cdot \frac{\Delta V}{L} \cdot A \cdot dt \quad (12)$$

Com ascensão d'água na tubulação (8) até uma altura d'água H, temos um gradiente hidráulico que provocará fluxo d'água na direção oposta à do gerado pelo gradiente elétrico, cujo valor é:

$$dq_h = K_h \cdot \frac{\Delta H}{L} \cdot A \cdot dt \quad (13)$$

Na tubulação de diâmetro a:

$$dh \cdot a = q_e - q_h \quad (14)$$

onde:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(K_e \Delta V - K_h \Delta H)}{aL} A \text{ ou } \frac{dh}{dt} = \frac{A}{aL} dt \quad (15)$$

que, resolvendo, obtem-se

$$K_e = \frac{K_h \cdot \Delta H}{\Delta V} \cdot \frac{e}{K_h \cdot At / (aL - 1)} \quad (16)$$

A máxima altura de ascensão (H_e), é obtida da condição:

$$\frac{dh}{dt} = 0 \quad (17)$$

que conduz a,

$$K_e \Delta V - K_h H_e = 0 \quad (18)$$

logo,

$$H_e = \frac{K_e}{K_h} \Delta V \text{ para } t = \infty \quad (19)$$

Analisando com mais detalhe a equação (19), vemos que para valores de:

$$K_h = 10^{-4} \text{ cm/s} \quad (\text{usual para os solos testados})$$

$$A = 10,12 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,14 \text{ cm}^2$$

$$L = 9,00 \text{ cm}$$

$$t = 24\text{h} = 86400\text{seg}$$

tem-se,

$$K_e = \frac{K_h H_e}{\Delta V} \cdot \frac{e}{\frac{10^{-4} \cdot 10,14 \cdot 86400 / 0,14 - 1}} = \frac{K_h H_e}{\Delta V} \cdot \frac{e}{69,5 - 1} \approx \frac{K_h H_e}{\Delta V}$$

simplificado,

$$K_e = \frac{K_h H_e}{\Delta V} \quad \text{para } t > 24 \text{ h} \quad (20)$$

Desta forma, para tempos suficientemente longos (mais de 24 h), o valor de K_e pode ser aproximadamente determinado em função de 3 parâmetros apenas, o que está de acordo com Casagrande⁷(1949) e também com as experiências por nós realizadas, onde não se notou diferenças expressivas para H_e em intervalos de tempo superiores a poucas horas após o início dos ensaios.

Todos os ensaios de medição de K_e foram de 24 h, já que o valor do mesmo é afetado por uma série de fatores (aumento resistividade, deposição de material proveniente dos eletrodos, etc) e decresce, segundo Geuze et al.^{2.0}(1948) em seus ensaios, após cerca de 32 h. Daí a padronização para 24 h, mesmo porque após certo tempo a própria eletro-osmose começa a ter suas vazões diminuídas, conforme Camberfort & Caron⁴ (1971), logo diminuindo então o valor de H_e e por conseguinte o valor de K_e . Além disso, face aos pequenos valores obtidos para H_e (poucos centímetros), tornou-se praticamente impossível acompanhar com precisão seu aumento ou decréscimo com o tempo, sendo apenas constatável que tal valor mantinha-se praticamente constante desde poucas horas após o início do ensaio até o final do mesmo.

Passando então à realização do ensaio propriamente dito, temos as seguintes fases:

- Término do ensaio de determinação de K_h ;
- Fechamento das torneiras das tubulações (4), (5) (superior) e (10);
- Abertura das torneiras das tubulações (7) e (8);
- Equilíbrio das colunas d'água nas tubulações (5) e (8);
- Aplicação de potencial elétrico na célula eletro-osmótica (10 volt/cm);
- Medição de H_e na tubulação (8), conforme mostrado esquematicamente nas Figs. 4A e 4B;
- Medição de K_e pela fórmula

$$K_e = \frac{K_h H_e}{\Delta V} \quad (20)$$

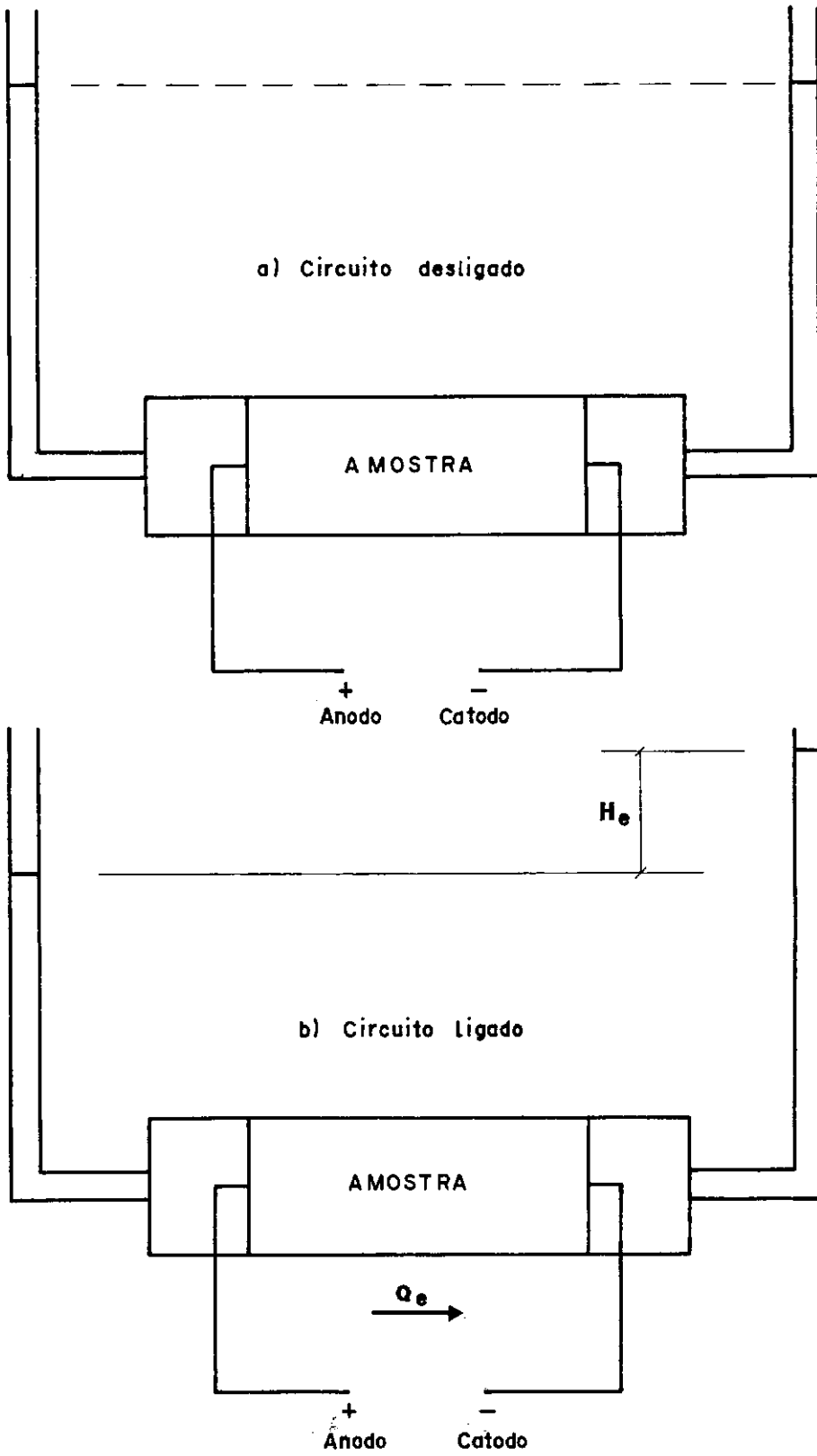


FIGURA 4 MEDIÇÃO DE He a) CIRCUITO DESLIGADO b) CIRCUITO LIGADO

3.3.3 Injeção de Produtos Químicos

Em continuação ao ensaio para determinação de K_e , foram executadas injeções de produtos químicos, sendo o "agente transportador" dos novos íons a corrente elétrica contínua.

A metodologia é a seguinte:

- a) Término do ensaio para determinação de K_e .
- b) Retirada d'água da coluna (5) através das tubulações (5), (11), (9) e (10).
- c) Retirada d'água da coluna (8) através da tubulação (10).
- d) Fechamento de todas as torneiras, exceto as das tubulações (9) e (10).
- e) Colocação de produtos químicos e água nos reservatórios da esquerda e da direita (vide Fig. 3), respectivamente. Tal colocação se faz através dos purgadores.
- f) Passagem de corrente elétrica, com gradiente de 1 volt, cujo valor foi fixado com base nas recomendações da bibliografia consultada.
- g) Recolocação periódica de produto químico no reservatório, durante um período que, por conveniência, foi fixado em 48 h.

3.3.4 Determinação dos Limites de Atterberg

Terminada a fase de injeção eletro-osmótica, as amostras eram retiradas das células e, a seguir, as seguintes determinações tinham curso:

- Umidades no catodo, anodo e meio da amostra;
- Limites de Liquidez e Plasticidade.

Observe-se que os limites de Atterberg foram também determinados simplesmente misturando os produtos químicos com os diversos tipos de solo ensaiados, a fim de que fossem evidenciadas as diferenças entre os solos injetados eletricamente e apenas misturados a determinado produto químico.

3.4 Características dos Solos e Produtos Químicos Ensaiaados

3.4.1 Os Solos

A descrição e característica físico-química dos diversos solos ensaiados é particularizada a seguir.

3.4.1.1 Solo A

- Local de obtenção: talude de BR-116, Nova Iguaçu - RJ
- Gênese: residual maduro de gneiss
- Cor: vermelha
- Granulometria:
 - argila = 40%
 - silte = 30%
 - areia fina = 26%
 - areia média = 4%
- Limites e Densidade dos grãos:
 - LL = 57%
 - LP = 30%
 - IP = 27%
 - δg = 2,90
- Análise Química:
 - SiO_2 (óxido de silício) = 24,60%
 - Al_2O_3 (óxido de alumínio) = 20,60%
 - Fe_2O_3 (óxido de ferro) = 7,40%
 - TiO_2 (óxido de titânio) = 0,96%
 - Outros (óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio , etc.) = 56,44%
- Caracterização Mineralógica
 - Ki (razão sílica/alumina) = 2,02
 - Kr (razão sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio) = 1,64
 - CTC (capacidade de troca catiônica, incluído o hidrogênio) = 9,10meq/100g
 - CT (cations trocáveis, não incluído o hidrogênio) = 5,30meq/100g
 - HT (hidrogênio trocável) = 3,80meq/100g
 - Matéria orgânica \dagger = 0,15%
 - PH (obtido com o acetato de am^Aônia) = 5,30
- Mineralogia (fração que passa na # 10, minerais predominantes)
 - Caolinita = 45,60%
 - quartzo = 47,00%

* *

$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 = 7,7\%$
 Gibsita = ausente

3.4.1.2 Solo B

- Local de obtenção: área de empréstimo, barragem Cha

 pêu d'Uvas, Juiz de Fora - MG
- Gênese: residual jovem de granito-gneiss .
- Cor: arroxeado
- Granulometria:
 - Silte = 45%
 - areia fina = 35%
 - argila = 10%
 - areia média = 10%
- Limites e Densidade dos grãos:
 - LL = 30%
 - LP = 21%
 - IP = 9%
 - $\delta g = 2,78$
- Análise Química
 - SiO_2 (óxido de silício) = 42,68%
 - Al_2O_3 (óxido de alumínio) = 32,65%
 - Fe_2O_3 (óxido de ferro) = 9,02%
 - TiO_2 (óxido de titânio) = 1,62%
 - Outros (óxido de cálcio, magnésio, sódio, potássio, etc.) = 14,03%
- Caracterização mineralógica
 - Ki (razão sílica/alumina) = 2,22
 - Kr (razão silício/sesquióxidos de ferro e alumínio) = 1,89
 - CTC (capacidade de troca catiônica, incluído o hidrogênio) = 14,10meq/100g
 - CT (cations trocáveis, não incluído o hidrogênio) = 5,3 meq/100g
 - HT (hidrogênio trocável) = 8,8 meq/100g
 - PH (obtido com acetato de amônia) = 6,6
- Mineralogia (fração que passa na # 10)
 - Caolinita = mineral predominante
 - Quartzo, fedspato e mica = minerais também encontra
 - dos, mas não predominantes.
 - Obs.: Porcentagens não determinadas

3.4.1.3 Solo C

- Local de obtenção: talude da BR-116, Nova Iguaçu - RJ
- Gênese: residual jovem de gneiss
- Cor: amarelado
- Granulometria:
 - argila = 55%
 - silte = 5%
 - areia fina = 20%
 - areia média = 20%
- Limites e Densidade dos grãos:
 - LL = 62%
 - LP = 29%
 - IP = 33%
 - δg = 2,70%
- Análise Química:
 - SiO₂ (óxido de silício) = 25,08%
 - Al₂O₃ (óxido de alumínio) = 28,50%
 - Fe₂O₃ (óxido de ferro) = 10,83%
 - TiO₂ (óxido de titânio) = 0,86%
 - Outros (óxidos de cálcio, magnésio, sódio, potássio , etc.) = 34,73%
- Caracterização Mineralógica:
 - Ki (razão sílica/alumina) = 1,99
 - Kr (razão sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio) = 1,19
 - CTC (capacidade de troca catiônica, inclusive hidrôgênio) = 10,16 meq/100g
 - CT (cations trocáveis, não incluído hidrôgênio) = 5,4 meq/100g
 - HT (hidrogênio trocável) = 4,76 meq/100g
 - PH (obtido com acetato de amônia) = 5,2
 - Matéria Orgânica = 0,55%
- Mineralogia (fração que passa # 10, minerais predominantes)
 - caolinita = 46,4%
 - quartzo = 35,00%
 - gibbsita = 7,2%

3.4.1.4 Solo D

- Local de obtenção: talude do pátio de Jeceaba, Jeceaba - MG

- Gênese: residual jovem de granodiorito máfico
- Cor: marrom
- Granulometria:
 - argila + silte = 55%
 - areia fina = 25%
 - areia média = 20%
- Limites e Densidade dos grãos:
 - LL = 44%
 - LP = 31%
 - IP = 13%
 - δg = 2,65
- Análise Química:
 - SiO₂ (óxido de silício) = 35,88%
 - Al₂O₃ (óxido de alumínio) = 26,24%
 - Fe₂O₃ (óxido de ferro) = 10,67%
 - TiO₂ (óxido de titânio) = 1,62%
 - CaO (óxido de cálcio) = 3,40%
 - MgO (óxido de magnésio) = 0,80%
 - Outros (óxidos de sódio, potássio, etc) = 21,39%
- Caracterização Mineralógica
 - Ki (razão sílica/alumina) = 2,35
 - Kr (razão sílica/sesquióxidos de ferro e alumínio) = 1,85
 - CTC (capacidade de troca catiônica, inclusive hidrogênio) = 15,2 meq/100g
 - CT (cations trocáveis, não incluído hidrogênio) = 6,4 meq/100g
 - HT (hidrogênio trocável) = 8,8 meq/100g
 - PH (obtido com acetato de amônia) = 6,6
- Mineralogia (fração que passa na #10)
 - Caolinita = mineral predominante
 - Quartzo, feldspato e mica = minerais também encontrados, mas não predominantes
 - Obs.: Porcentagens não determinadas.

3.4.1.5 - Solo E

- Local de obtenção: cava do Metropolitano, Rio de Janeiro - RJ (vide também Cap. IV, para maiores detalhes)
- Gênese: solo transportado, sedimentar marinho, orgânico

nico.

- Cor: cinza escuro
- Granulometria:
 - argila = 45%
 - silte = 25%
 - areia fina = 30%
- Limite e Densidade dos grãos:
 - LL = 75
 - LP = 28
 - IP = 47
 - δg = 2,68
- Análise por raios-X revelou ser o mineral argílico pre dominante a caolinita.

3.4.2 Os Produtos Químicos

A escolha dos produtos químicos a serem utilizados levou em conta a experiência estrangeira documentada, em par te, na Tabela 2, e à disponibilidade no momento, no laboraratório, de:

- Cloreto de sódio
- Cloreto de lítio
- Cloreto de amônia
- Cloreto de alumínio

Não se pretendeu verificar qual o produto químico que melhor reage com cada tipo de solo. Trata-se de um primeiro estudo sobre o eletro-endurecimento e de interpretação do fenômeno, de âmbito restrito.

As concentrações utilizadas no eletro-endurecimento (2%), foram estabelecidas de modo a estarem coerentes com pesquisas já feitas e evitarem excessiva corrosão na aparelhagem.

3.5 Resultados dos Ensaio Realizados

3.5.1 Apresentação

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios para os solos estudados e diferentes produtos químicos. Nela figuram os Índices de Atterberg (LL, LP e IP) e a densidade dos grãos (δg) do solo não tratado, sob o título da coluna "Normal". Sob o título "SÓDIO", por exemplo, tem-se

INVESTIGADOR	SOLO TRATADO	PRODUTO QUÍMICO*	CONCENTRAÇÃO SOLUÇÃO
ADAMSON, ET AL. ^{**}	montmorilonita e argila arenosa	Cloreto cálcio Sulfato de alumínio	Não especificado
BALY & ANTONESCO ¹ (1961)	Silte arenoso	Silicato sódio Cloreto cálcio	1,2 (densidade) 1,1 (densidade)
BOIKO ^{**}	Argiloso	Cloreto cálcio Óxido cálcio	Não especificado
CAMBEFORT & CARON ⁴ (1961)	Argila Provins	Cloreto amônia Carbono lítio Soda Sabão catiônico Sabão aniônico	10% 1% 2,8% 5% 5%
CARON ⁶ (1971) ^{***}	USA URSS NORUEGA FRANÇA	Cloreto lítio Silicato sódio Cloreto sódio Cloreto amônia	Não especificado
ESRIG ^{**}	Argiloso	Hidróxido potássio Cloreto cálcio Cloreto amônia Fosfato potássio Sulfato ferro Silicato sódio Sulfato sódio Sulfato alumínio AM - 9 ARQUAD 2 HT - 75 ALIQUAT H 226 CHEMPACT	Não especificado
GRAY ²¹ (1970)	Argila de Vicksburg	Cloreto alumínio	1% (anodo), 0,5% (catodo)
MITCHELL ³¹ (1976)	Bentonita	Glicol polietileno	0,38%
SOLETANCHE ³⁸ (1953)	Argila de Bordeaux	Cloreto e nitrato amônia	Não especificado

* O uso de eletrodos de alumínio não foi considerado

** Segundo Robnett³⁵ (1973)

*** Citando as preferências mundiais

TABELA 2. TIPOS DE PRODUTOS QUÍMICOS USADOS EM INVESTIGAÇÕES PRÉVIAS

ENSAIOS	SOLO A				SOLO B					SOLO C				SOLO D		SOLO E	
	1 (NORMAL)	2 (SÓDIO)	3 (LÍTIO)	4 (AMÔNIA)	1 (NORMAL)	2 (SÓDIO)	3 (LÍTIO)	4 (ALUMÍNIO)	5 (AMÔNIA)	1 (NORMAL)	2 (SÓDIO)	3 (LÍTIO)	4 (AMÔNIA)	1 (NORMAL)	2 (AMÔNIA)	1 (NORMAL)	2 (ELET. DREN.)
K_h (cm/s)	—	6×10^{-5}	15×10^{-5}	32×10^{-5}	—	1×10^{-5}	20×10^{-5}	5×10^{-5}	3×10^{-5}	—	2×10^{-5}	9×10^{-5}	13×10^{-5}	—	24×10^{-5}	—	—
K_e (cm/s/v/cm)	—	$1,35 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$0,4 \times 10^{-5}$	—	3×10^{-5}	13×10^{-5}	1×10^{-5}	$0,4 \times 10^{-5}$	—	—	1×10^{-5}	3×10^{-5}	—	$2,6 \times 10^{-5}$	—	—
e_i	—	1,08	1,6	2,0	—	1,06	1,10	1,06	1,03	—	0,93	1,09	1,3	—	1,16	—	1,8
δ_g	2,90	—	—	—	2,78	—	—	—	—	2,70	—	—	—	2,65	—	2,68	—
W_i (%)	—	34	30	10	—	2	2	1	2	—	22	2	2	—	1	—	45
S_i (%)	—	91	54	15	—	5	5	3	5	—	64	5	4	—	2	—	95
$W_f +$ (%)	—	48	49	63	—	45	52	45	37	—	39	41	40	—	52	—	43
W_f (%)	—	43	50	51	—	44	42	42	35	—	29	48	45	—	45	—	37
$W_f -$ (%)	—	46	56	57	—	43	44	39	38	—	35	43	45	—	44	—	45
$LL + -$ (%)	—	56	60	57	—	37	37	38	36	—	75	53	51	—	36	—	50
$LP + -$ (%)	—	33	36	38	—	29	19	24	17	—	25	29	30	—	23	—	24
$IP + -$ (%)	—	23	24	19	—	8	18	14	9	—	50	24	21	—	13	—	26
LL_M (%)	—	53	58	56	—	36	33	34	34	—	62	58	55	—	43	—	—
LP_M (%)	—	36	31	30	—	19	20	18	20	—	27	30	27	—	37	—	—
IP_M (%)	—	17	27	26	—	17	13	16	14	—	35	28	28	—	6	—	—
LL (%)	57	—	—	—	30	—	—	—	—	62	—	—	—	44	—	75	—
LP (%)	30	—	—	—	21	—	—	—	—	29	—	—	—	31	—	28	—
IP (%)	27	—	—	—	9	—	—	—	—	33	—	—	—	13	—	47	—
AMOSTRA	AMOLG.	INDEF.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	INDEF.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.	AMOLG.

TABELA 3 QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ELETRO-ENDURECIMENTO

uma coluna com os resultados de; permeabilidade hidráulica (K_h), permeabilidade eletro-osmótica (K_e), índice de vazios inicial (e_i), umidade inicial (W_i), grau de saturação inicial (S_i), umidade final no anodo após o eletro-endurecimento (W_f^+), umidade final na região equidistante dos eletrodos após o eletro-endurecimento (W_f), umidade final no catodo após o eletro-endurecimento (W_f^-), limite de liquidez após o eletro-endurecimento (LL^{+-}), limite e índice de plasticidade após o eletro-endurecimento (LP^{+-} e IP^{+-}), índices de Atterberg após mistura do cloreto de sódio com o solo, sem o uso de eletro-endurecimento (LL_m , LP_m e IP_m).

Os termos "AMOLG" e "INDEF", situados ao final das várias colunas, referem-se ao estado inicial do corpo de prova; se amolgados ou indeformados, respectivamente.

3.5.2 Análise dos Resultados

3.5.2.1 Coeficiente de Permeabilidade Hidráulica

Pode-se confirmar que o coeficiente de permeabilidade hidráulica cresce com o índice de vazios, pelos ensaios com os solos A, B e C. Os valores de K_h variaram de 2×10^{-5} cm/s (ensaio 2, solo C) a 32×10^{-5} (ensaio 4, solo D), sendo os índices de vazios de 0,93 e 2, respectivamente.

No solo E (argila orgânica) não foi realizado ensaio de permeabilidade hidráulica dado ao tempo que levaria tal ensaio (a coluna d'água disponível era de cerca de apenas 2m), e os valores do adensamento unidimensional não são aplicáveis face ao amolgamento da amostra. Por conseguinte, não foi determinado o valor de K_e para este solo, já que esta determinação depende de K_h .

3.5.2.2 Coeficiente de Permeabilidade Eletro-Osmótica

A exceção do valor 13×10^{-5} cm/s/volt/cm (ensaio 3, solo B), os demais valores de K_e oscilam entre $0,4 \times 10^{-5}$ e 3×10^{-5} cm/s/volt/cm.

Portanto, enquanto os valores de permeabilidade hidráulica variavam de 2×10^{-5} a 32×10^{-5} cm/s, os valores de K_e pouco se modificaram, confirmando as premissas de Leo

Casagrande, o qual afirma que, embora o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica varie, seu valor para aplicações práticas é da ordem de 5×10^{-5} cm/s/volt/cm.

Assim, dois fatos devem ser ressaltados:

- A faixa de variação de K_e é menor que a dos valores de K_h nos solos ensaiados;
- Os valores obtidos para K_e estão próximos aos indicados por Casagrande⁸ (1957) e Bjerrum et al.² (1967), sendo da ordem de 2×10^{-5} cm/s/volt/cm para os solos residuais ensaiados.

Mais ainda, em alguns casos, com aumento ou mesmo com a manutenção do índice de vazios, houve decréscimo do valor do coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica (ensaios 2 e 4, solo A e ensaios 2 e 4, solo B, respectivamente).

Cabe ainda ressaltar que foi impossível calcular o valor de K_e no caso dos ensaios 2 do solo C, devido a imprecisão na determinação de H_e .

Outrossim, o valor de 13×10^{-5} cm/s/volt/cm, para o ensaio 3 do solo B, destoa dos demais valores encontrados. Na falta de um conhecimento mais seguro dos fenômenos físico-químicos dos solos ensaiados e de uma experimentação mais completa, não se pode interpretar o ocorrido.

3.5.2.3 Umidade, Grau de Saturação, Densidade dos Grãos e Índice de Vazios

Os valores para grau de saturação apresentados são ora muito baixos ora altos. Isto se deve ao fato de que alguns corpos de prova foram moldados e outros levemente compactados. Os moldados foram obtidos de blocos indeformados e os compactados a partir do material resultante de moldagens prévias. Desta forma, obteve-se grau de saturação alto para os corpos de prova moldados e valor baixo para os que foram compactados. Contudo, como em todos os ensaios procedeu-se à saturação das

amostras, eliminou-se o problema dos diferentes valores de Si.

Semelhantemente, o mesmo ocorreu com os valores iniciais do teor de umidade e índice de vazios. Quanto aos últimos, sua variação permitiu observar qual o efeito da mesma nos valores de Ke (vide item 3.5.2.2).

Os valores das umidades após o eletro-endurecimento medidos no anodo, catodo e meio da amostra são bastante próximos para os diversos solos ensaiados, talvez em virtude de de catodo e anodo serem líquidos. A medição de tais valores objetivou:

- Verificar se o produto químico inserido no anodo havia, de certa forma, percolado pelo interior das amostras ensaiadas;
- Observar se as umidades estavam acima do limite de plasticidade, já que, segundo Casagrande⁷ (1949), para umidades abaixo deste limite o efeito da eletro-osmose é praticamente nulo.

Como pode ser visto na Tabela 4, o exposto acima foi plenamente confirmado, tendo em vista os valores das umidades e dos limites de plasticidade.

3.5.2.4 Limites de Atterberg

3.5.4.2.1 Considerações Gerais

A variação dos limites de Atterberg, quando da eletro-osmose, nem sempre se processa de uma mesma maneira. Assim é que, na eletro-drenagem, Bjerrum² (1967) notou um aumento dos limites de liquidez e plasticidade no solo tratado. Além disso, concluiu, o mesmo pesquisador, que o aumento da resistência ao cisalhamento obtido não podia ser totalmente creditado à diminuição de umidade, existindo uma outra parcela de fatores que também influenciaram o aumento dos limites de Atterberg.

Já para a dissolução de eletrodos de alumínio, Casagrande⁸ (1957), comentando a bibliografia 48.2, afirma que em suas experiências sempre notou, decréscimo do limite de liquidez, aumento do limite de plasticidade e, portanto, diminuição do índice de plasticidade, para um aumento da resistência ao cisalhamento dos solos ensaiados. Contudo,

Endell e Hoffmann¹⁵ (1936), utilizando este mesmo processo, constatam decréscimo tanto no limite de liquidez como no limite de plasticidade, para um grande aumento de resistência ao cisalhamento do solo tratado.

Na injeção de produtos químicos eletricamente, Cambefort & Caron⁴ (1961), além de Esrig & Gemeinhardt¹⁶ (1967), constatam que o aumento de resistência do solo está associado a um aumento dos limites de Atterberg, sobretudo, na zona de PH superior a 7 (zona próxima ao catodo). Porém, Gray²¹ (1970) observa que, apesar da resistência ao cisalhamento aumentar, os limites de liquidez crescem ou não se alteram, dependendo do tipo de solo tratado.

Portanto, para o assunto de que trata este capítulo, o eletro-endurecimento, torna-se difícil analisar o aumento de resistência ao cisalhamento de um solo simplesmente através dos limites de Atterberg, sem que ensaios complementares sejam feitos paralelamente.

Tal raciocínio pode ser melhor avaliado, se tivermos em mente os fenômenos principais que ocorrem no eletro-endurecimento, segundo Gray²¹ (1970):

- troca catiônica
- alteração dos minerais
- modificação da estrutura
- criação de novas fases minerais

Assim sendo, a discussão a seguir se aterá, tão somente, à observação da variação ou não dos limites de Atterberg, sem que considerações sobre acréscimo ou decréscimo de resistência ao cisalhamento dos solos tratados pelo eletro-endurecimento sejam feitas.

35.4.2.2 Discussão dos Resultados

Apesar de serem todos os ensaios feitos pelo mesmo operador, os resultados aqui discutidos podem ter seus valores questionados, já que a consolidação das amostras se dá, sobretudo, na zona catódica, e quando da determinação dos limites as zonas catódicas e anódicas foram misturadas dadas as pequenas dimensões da célula eletro-osmótica. Além disso, ensaios de compressão simples, "vane-tests", etc., que poderiam esclarecer ainda mais

os resultados, não foram realizados pelas mesmas razões acima descritas. Finalmente, o tempo de tratamento foi pequeno se comparado ao tempo gasto por Caron⁶ (71), por exemplo, que tratou suas amostras de solo ao longo de 1 ano, com altas concentrações de produtos químicos (10%).

a) Solo A

Os valores do limite de liquidez após-tratamento pouco variaram em relação ao valor pré-tratamento. Contudo, os índices de plasticidade foram diminuídos, tomando-se como base o valor pré-tratamento, face ao ligeiro aumento dos limites de plasticidade após o eletro-endurecimento.

Os limites de Atterberg, misturando-se simplesmente os produtos químicos com o solo em questão, são equivalentes aos valores normais (à exceção do ensaio 2). Evidenciando as diferenças entre os dois tipos de tratamento, onde o eletro-endurecimento forçaria a troca catiônica ao atuar nos cations adsorvidos, estão os valores de LP e IP nas amostras injetada e não eletro-endurecida.

b) Solo B

Todos os limites de liquidez e de plasticidade após-tratamento aumentaram, à exceção do limite de plasticidade do ensaio 3, em relação aos valores de pré-tratamento. Aumentaram também todos os limites de liquidez obtidos após misturas dos produtos químicos com solo B. Contudo, os limites de plasticidade após mistura, pouco variaram em relação ao valor de pré-tratamento.

A diferença de comportamento dos limites de Atterberg, no caso de injeção eletro-química e mistura pura e simples produtos químicos, evidencia mais uma vez o fenômeno do eletro-endurecimento.

c) Solo C

Na amostra tratada com cloreto de sódio houve um grande aumento dos limites de liquidez e plasticidade, diminuindo o valor do índice de plasticidade. Nos demais ensaios de eletro-endurecimento, houve diminuição dos limites de liquidez e índices de plasticidade, mantendo-se praticamente inalterados os limites de plasticidade.

dade.

Já na mistura de produtos químicos, os valores obtidos situam-se no entorno dos de pré-tratamento.

Mais uma vez, houve diferenças sensíveis, especialmente com cloreto de sódio, entre os resultados obtidos através do eletro-endurecimento e da mistura de produtos químicos ao solo tratado.

d) Solos D e E

O solo D foi tratado apenas com cloreto de amônia e seus limites de liquidez e plasticidade, após tratamento por eletro-endurecimento, decresceram, mantendo-se inalterado o índice de plasticidade.

Os valores obtidos misturando-se cloreto de amônia com o solo D foram aproximadamente iguais aos de pré-tratamento, à exceção do índice de plasticidade que diminui, mostrando diferenças os dois tipos de tratamento.

A razão pela qual o solo D só foi ensaiado com um produto químico, reside no fato de que o objetivo desta pesquisa já tinha sido cumprido, isto é, mudanças das propriedades físico-químicas de vários solos após o tratamento por eletro-endurecimento ocorreram e foram notadas através dos limites de Atterberg, não sendo nossa meta pesquisar exaustivamente qual produto químico melhor reage com determinado tipo de solo.

O solo E, não teve o tratamento de eletro-endurecimento, sendo apenas aplicado o processo de eletro-drenagem.

Não se obteve sucesso na moldagem de novas amostras do solo E na célula eletro-osmótica, para as quais aplicar-se-iam períodos de tratamento mais longo, já que a aplicação inicial submeteu a amostra à uma diferença de potencial durante algumas poucas horas (8h). Esta mesma dificuldade de moldagem fez com que injeções de produtos químicos fossem suprimidos no solo. E, além do que as medições de K_h e K_e , que também eram importantes no desenvolvimento dos ensaios, seriam quase impossíveis de realizar.

Finalmente, cabe observar que os limites de liquidez

e plasticidade, e índice de plasticidade após a eletro-drenagem, decresceram em relação aos valores de pré-tratamento no solo E.

3.6 Conclusões

As principais conclusões deste capítulo, com relação à permeabilidade eletro-osmótica, são:

- A faixa de variação dos valores medidos de K_e é menor que a dos valores de K_h , para os diversos solos ensaiados;
- Os valores medidos de K_e encontram-se próximos aos preconizados por Casagrande⁷ (1949) e Bjerrum²¹ (1967), o que mostra a validade dos critérios e aparelhagem empregados, e são da ordem de 2×10^{-5} cm/s/volt/cm para os solos residuais ensaiados;

Para o eletro-endurecimento, temos que:

- A injeção de produtos químicos através da eletro-osmose (eletro-endurecimento) provocou mudanças nas propriedades físico-químicas dos solos ensaiados;
- Tais mudanças foram constatadas através de variações nos limites de liquidez e plasticidade, além do índice de plasticidade, antes e após o eletro-endurecimento;
- Ao atuar nos cations adsorvidos, o eletro-endurecimento produz resultados diferentes dos provocados pela mistura mecânica de produtos químicos;
- Os limites de Atterberg antes e após o eletro-endurecimento variam diferentemente, podendo decrescer ou permanecer inalterados dependendo do solo e produto químico usados, o que está de acordo com os resultados obtidos por Gray²¹ (1970).

Como sugestão para futuros ensaios propomos que:

- Os ensaios de medição de K_e e eletro-endurecimento sejam feitos com diversos tempos de duração, a fim de melhor conhecer-se o comportamento da eletro-osmose com o tempo;
- As concentrações das soluções químicas deverão ser também variadas, para que se conheça qual seu valor ótimo, para um determinado tipo de solo;
- A célula do eletro-permeâmetro deverá ser aumentado para que: ensaios tipo "vane-test" possam ser feitos, a

moldagem seja mais rápida, o volume da amostra mais representativo, exista material suficiente para outros ensaios de laboratório, não haja mistura de material da zona anódica com a catódica na execução de determinado ensaio, e permita, ainda, a execução de ensaios de adensamento eletro-osmótico e/ou convencional.

- As tubulações que darão acesso à célula do eletro-permeâmetro, deverão ser mais resistentes, de modo a que se possa aplicar pressão à água, quando do ensaio de permeabilidade hidráulica em solos muito pouco permeáveis.

CAPÍTULO IV

ELETRO-DRENAGEM

4.1 Introdução

Neste capítulo a eletro-drenagem é estudada sob dois aspectos distintos, isto é, sua influência na compressão primária e na compressão secundária.

Para tanto, diversos ensaios de adensamento unidimensional foram feitos em uma argila orgânica da Cidade do Rio de Janeiro. Em determinadas fases destes ensaios, gradientes elétricos foram aplicados, produzindo-se então fluxo d'água com o consequente adensamento do solo.

As teorias e considerações sobre o adensamento de um solo submetido a um campo elétrico são também brevemente descritas.

4.2 As Teorias da Eletro-Drenagem

Na prática, a vazão d'água provocada por gradiente elétrico é dada por:

$$q_e = K_e i_e A \quad (21)$$

onde q_e é vazão, K_e o coeficiente de permeabilidade eletro-osmótico, i_e o gradiente elétrico, e A a área de seção transversal normal ao fluxo.

O valor de K_e pode ser medido em laboratório (vide capítulo III) ou, alternativamente, deduzido do Potencial de Fluxo (vide capítulo II).

As diversas experiências feitas no âmbito mundial mostram K_e variando de 1×10^{-5} a 5×10^{-5} cm/s/volt/cm.

Entretanto, diversas teorias foram elaboradas para interpretar a física do processo. O sumário dessas teorias, segundo MITCHELL³¹ (1976), é apresentado na Tabela 4.

Nesta tabela as seguintes notações aparecem:

- Teoria de HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI

E = potencial zeta (diferença de potencial entre as partes fixa e móvel da dupla-camada)

D = constante dielétrica (em analogia ao que ocorre entre as placas de um condensador)

n = porosidade do solo

η = viscosidade da água

d = distância basal (distância entre duas unidades básicas de formação de um mineral argílico)

A^0 = angstrom = 10^{-7} mm

TEORIAS	PREMISSAS	CONSEQUÊNCIAS
<p>1) HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI</p> $K_e = \frac{E D}{4 \pi \eta} n$	<p>a) Cations concentrados na dupla camada numa interface sólido x líquido.</p> <p>b) A espessura DL é desprezível em relação ao diâmetro dos poros.</p> <p>c) A água migra com mesma velocidade que os cations.</p>	<p>a) Aplicável a sistemas com grandes poros ($d > 1000A^0$) e soluções diluídas (concentração $< 0,1\%$ em peso).</p> <p>b) Independente do tamanho dos poros, mas função direta da porosidade.</p>
<p>2) SCHMID</p> $K_e = \frac{A_0 F_0 r^2}{8 \eta} n$ $A_0 = f(n)$	<p>a) Cations uniformemente distribuídos nos poros.</p> <p>b) Força elétrica proporcional à densidade de carga, e uniforme em todo o poro.</p>	<p>a) $d < 1000A^0$</p> <p>b) Irreal em sistemas altamente salinos.</p> <p>c) Sensível função do tamanho dos poros.</p> <p>d) Varia com a porosidade.</p>
<p>3) SPIEGLER</p> $\Omega = (W - H) =$ $= \frac{C_3}{C_1 + C_3 (X_{34} - X_{13})}$	<p>a) Função de concentração d'água e cations móveis numa membrana, além de dois coeficientes de atrito.</p> <p>b) Membrana permselectiva (não há ânions).</p> <p>c) Íons completamente dissociados.</p>	<p>a) O acréscimo de umidade ou o decréscimo da concentração dos cations, leva a um acréscimo na vazão d'água.</p>
<p>4) HIDRATAÇÃO DO ÍON</p> $H = t_+ N_+ - t_- N_-$	<p>a) A água é transportada como água de hidratação dos íons em migração.</p>	<p>a) Quanto maior a diferença entre os números de transportes (+) e (-), maior será a vazão d'água.</p>

TABELA 4. SUMÁRIO DAS TEORIAS SOBRE ELETRO-DRENAGEM (SEGUNDO MITCHELL,³¹ 1976).

- Teoria de SCHMID

F_0 = constante de Faraday

n = porosidade do solo

r = raio de um capilar

η = viscosidade d'água

A_0 = concentração de cargas elétricas

d = distância basal

- Teoria de SPIEGLER

Ω = fluxo d'água

W = fluxo d'água medido

H = hidratação dos íons

C_3 = concentração da água livre na membrana

C_1 = concentração dos cations na membrana

X_{34} = coeficiente de atrito entre água e membrana

X_{13} = coeficiente de atrito entre cation e água

- Teoria da Hidratação do Íon

H = transporte de ions hidratados

$t(+)$ e $t(-)$ = números de transporte (números que representam a fração de corrente levada por um tipo particular de íon)

$N(+)$ e $N(-)$ = Número de moles de água hidratada por mole de cation ou ânion, respectivamente

Finalizando, MITCHELL³¹ (1976) afirma que nenhuma das teorias traduz corretamente o fenômeno da eletro-drenagem, o que não é tão relevante, tendo em vista que K_e é aproximadamente constante e pode-se prever quando a eletro-drenagem será eficiente sem necessidade de nenhuma teoria específica.

4.3 O Adensamento do Solo

ESRIG¹⁷ (1968) desenvolveu matematicamente equações para a eletro-drenagem, supondo que:

- A estrutura do solo é uniforme e o material está totalmente saturado;
- As propriedades físico-químicas são uniformes e não variam com o tempo em toda a massa de solo;
- Não ocorre a eletro-forese, sendo a massa de solo inicialmente incompressível;
- Existe uma proporcionalidade entre a velocidade d'água

- e o gradiente elétrico aplicado. Tal proporcionalidade (K_e) é uma propriedade do solo e não varia com o tempo;
- Toda voltagem é utilizada no transporte da água;
 - O campo elétrico estabelecido não se altera com o tempo;
 - Não existem reações, tal como a eletrólise e a eletroforese, ocorrendo entre os eletrodos;
 - O fluxo d'água gerado por gradiente elétrico e hidráulico pode ser superposto.

O desenvolvimento de poro-pressão para diversos casos pode ser visto na Fig. 5. Assumindo uma distribuição linear de voltagem, tem-se que para anodo e catodo drenados (livres ao acesso de fluído) não há desenvolvimento de poro-pressão (Fig. 5a). Este é exatamente o caso do eletro-endurecimento com injeção de produtos químicos.

Para anodo não drenado e catodo drenado, (Fig. 5b), a poro-pressão gerada será negativa.

Esta situação é que nos interessará quando do adensamento de solos finos, em que a poro-pressão negativa induzida gerará aumento das pressões efetivas, com a pressão total permanecendo constante. Finalmente, para anodo drenado e catodo não drenado (Fig. 5c), há o desenvolvimento de uma poro-pressão positiva. Esta condição de fronteira seria útil nos casos de recuperação de estruturas metálicas enterradas e no retardamento de atrito negativo em estacas cravadas nos solos finos.

A Fig. 6, analogamente ao caso mostrado anteriormente em que os eletrodos são placas infinitas, mostra o caso onde os eletrodos são cilíndricos.

As considerações são para fluxos unidimensionais, regidos unicamente por gradiente elétrico.

Será tratado agora, exclusivamente, o caso, ao nosso ver, mais importante, que é o da condição catodo drenado e anodo não drenado. Vê-se, na Fig. 5b, que a consolidação do solo se faz de maneira heterogênea. Para superar este problema, pode-se usar a reversão de corrente a fim de homogeneizar a zona adensada. Tal reversão consiste na inversão da polaridade dos eletrodos ao cabo de certo tempo de tratamento.

WAN³(1970) usou este tipo de tratamento em seus ensaios e chegou a conclusão que a distribuição de poro-pressões

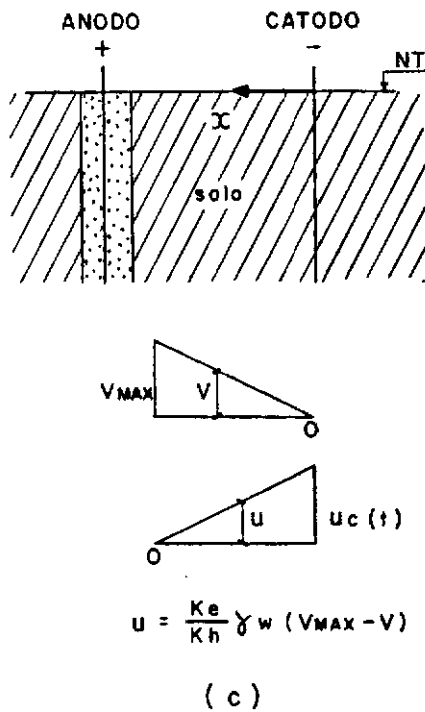
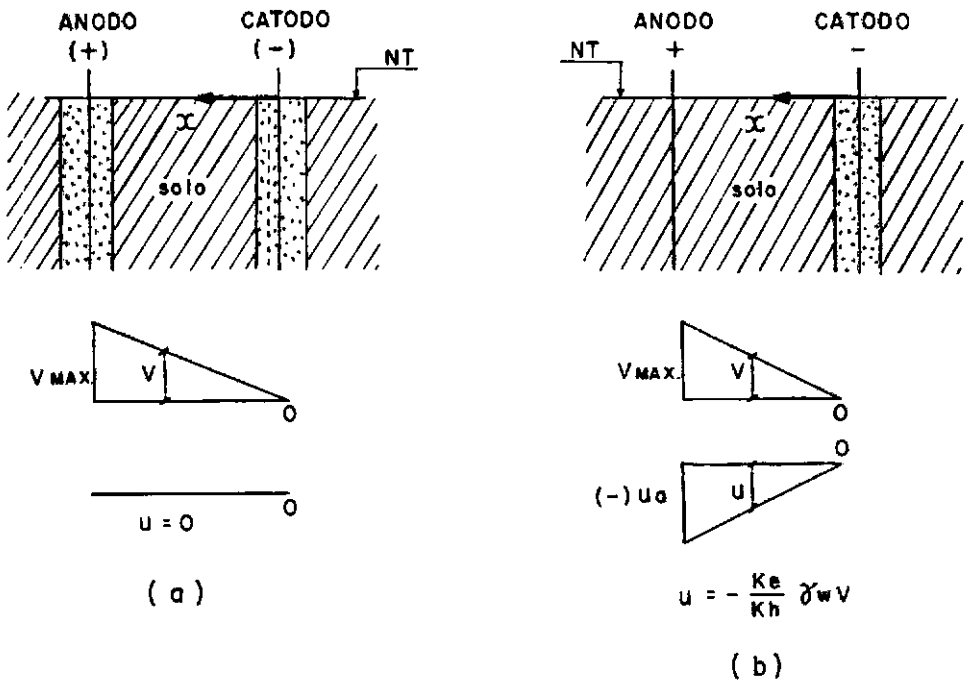
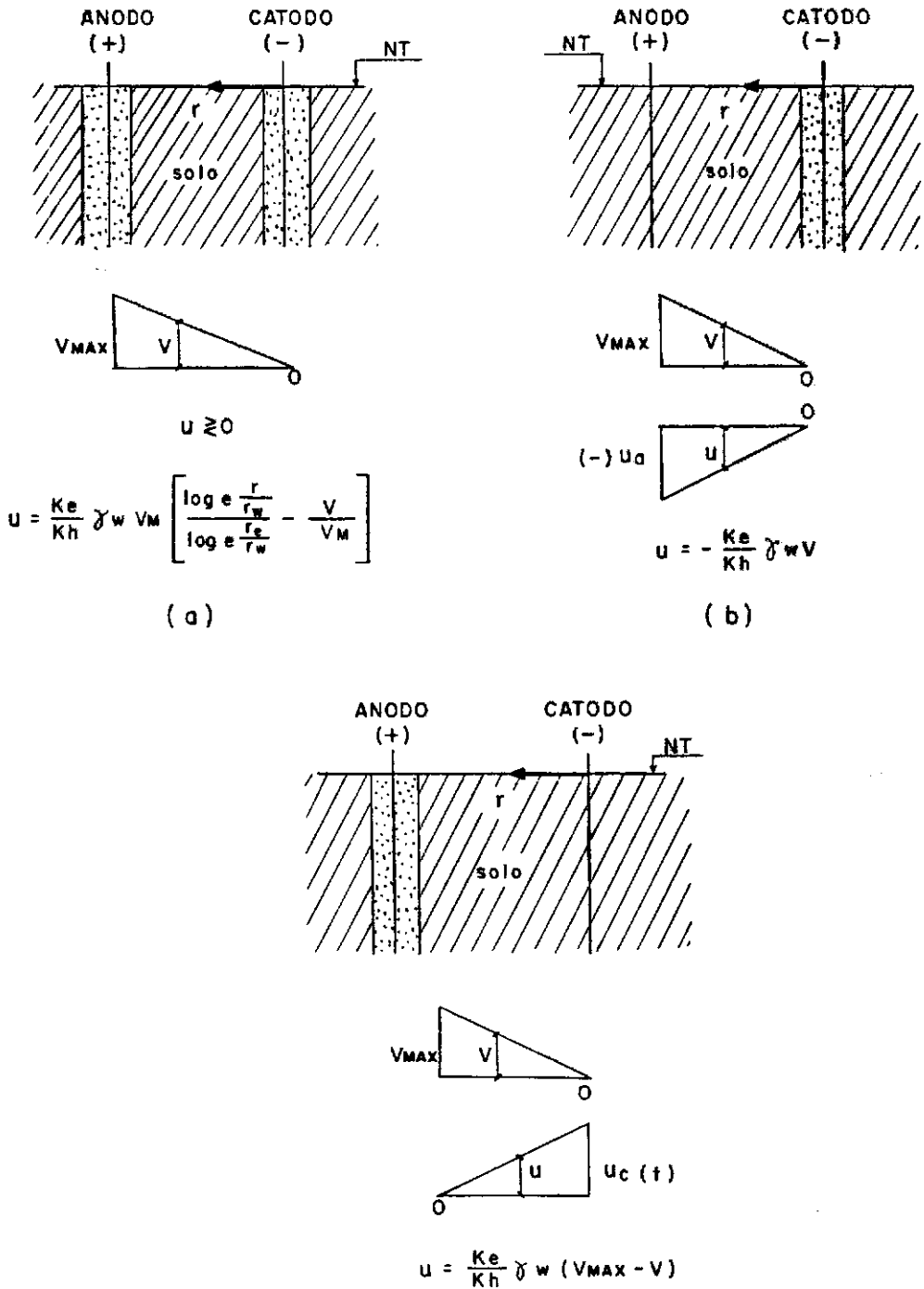


FIGURA 5 - FLUXO ELETRO-OSMÓTICO PARA ELETRODOS COM PLACAS SEMI-INFINITAS. FIG.5a ANODO E CATODO DRENADOS FIG.5b ANODO NÃO DRENADO E CATODO DRENADO FIG.5c ANODO DRENADO E CATODO NÃO DRENADO (Segundo Esrig¹⁷, 1968)



Obs: r_w = raio do eletrodo
 r_e = distância entre os eletrodos

FIGURA 6 - FLUXO ELETRO-OSMÓTICO PARA ELETRODOS CILÍNDRICOS
FIG.6a ANODO E CATODO DRENADOS
FIG.6b ANODO NÃO DRENADO E CATODO DRENADO
FIG.6c ANODO DRENADO E CATODO NÃO DRENADO
 (Segundo Esrig¹⁷, 1968)

negativas se fará como o mostrado na Fig. 7.

Outro aspecto importante do problema, consiste em saber-se qual a evolução do adensamento com o tempo. ESRIG¹⁷

(1968) resolveu a equação do adensamento para pressão neutra inicial zero (não há superposição de gradiente elétrico e hidráulico), conforme o exposto na Fig. 8.

WAN⁴³(1970) mostra a mesma solução, porém em termos de máxima pressão neutra e pressão neutra média relacionada ao fator tempo, conforme Figs. 9 e 10.

Superpondo-se os fluxos gerados por gradientes elétrico e hidráulico (há excesso de pressão neutra inicial positiva e uniforme), WAN⁴³(1970) chega às relações mostradas nas Figs. 11 e 12. Note-se que a partir da Fig. 11 pode-se saber quando encerrar o tratamento da eletro-drenagem (equivalente a dizer, quando retirar uma sobrecarga estática num processo de adensamento convencional), e na Fig. 12 a relação $\frac{u_a}{u_0} = 0$ é a solução de TERZAGHI para

a equação do adensamento.

Desta forma, é importante ressaltar que:

- O tempo necessário para que as poro-pressões negativas (e daí o adensamento) se desenvolvam é função de T_v , o qual está relacionado com o coeficiente de adensamento C_v . O valor de C_v não depende da permeabilidade eletroosmótica K_e , e sim da permeabilidade hidráulica e da compressibilidade do solo;
- A eletro-drenagem, portanto, não influencia a velocidade de adensamento, ela somente tem importância na magnitude dos recalques. Logo, a eletro-drenagem funciona como uma sobrecarga estática, com a única vantagem de não provocar a rotura do solo. A Fig. 13 mostra esquematicamente o raciocínio ora elaborado.

4.4 Aparelhagem

4.4.1 Concepção

A aparelhagem que se utilizou nesta pesquisa, sobre a eletro-drenagem, é bastante simples e pode ser adaptada a qualquer equipamento convencional de adensamento unidimensional.

ELETRODO

ELETRODO

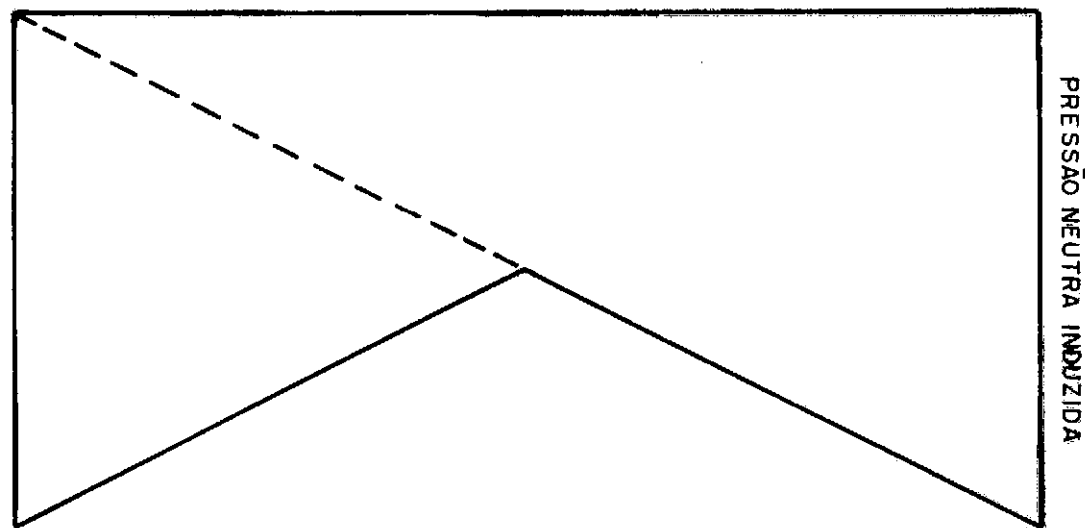


FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES NEUTRAS INDUZIDAS POR ELETRO-OSMOSE COM REVERSÃO DE CORRENTE (SEGUNDO WAN¹³, 1970)

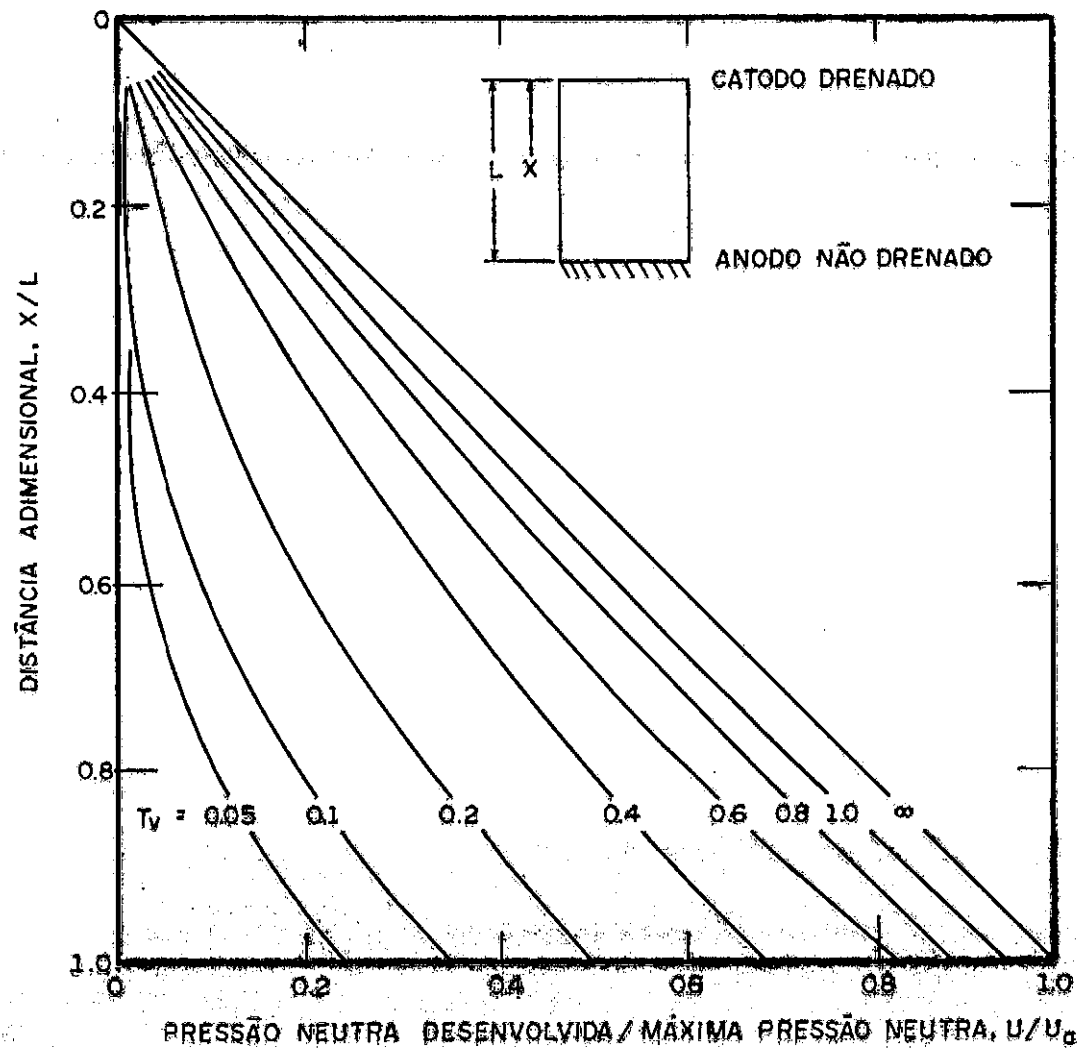


FIGURA 8 - ADENSAMENTO UNIDIMENSIONAL POR ELETRO-OSMOSE (SEGUNDO ESRIG¹⁷, 1968)

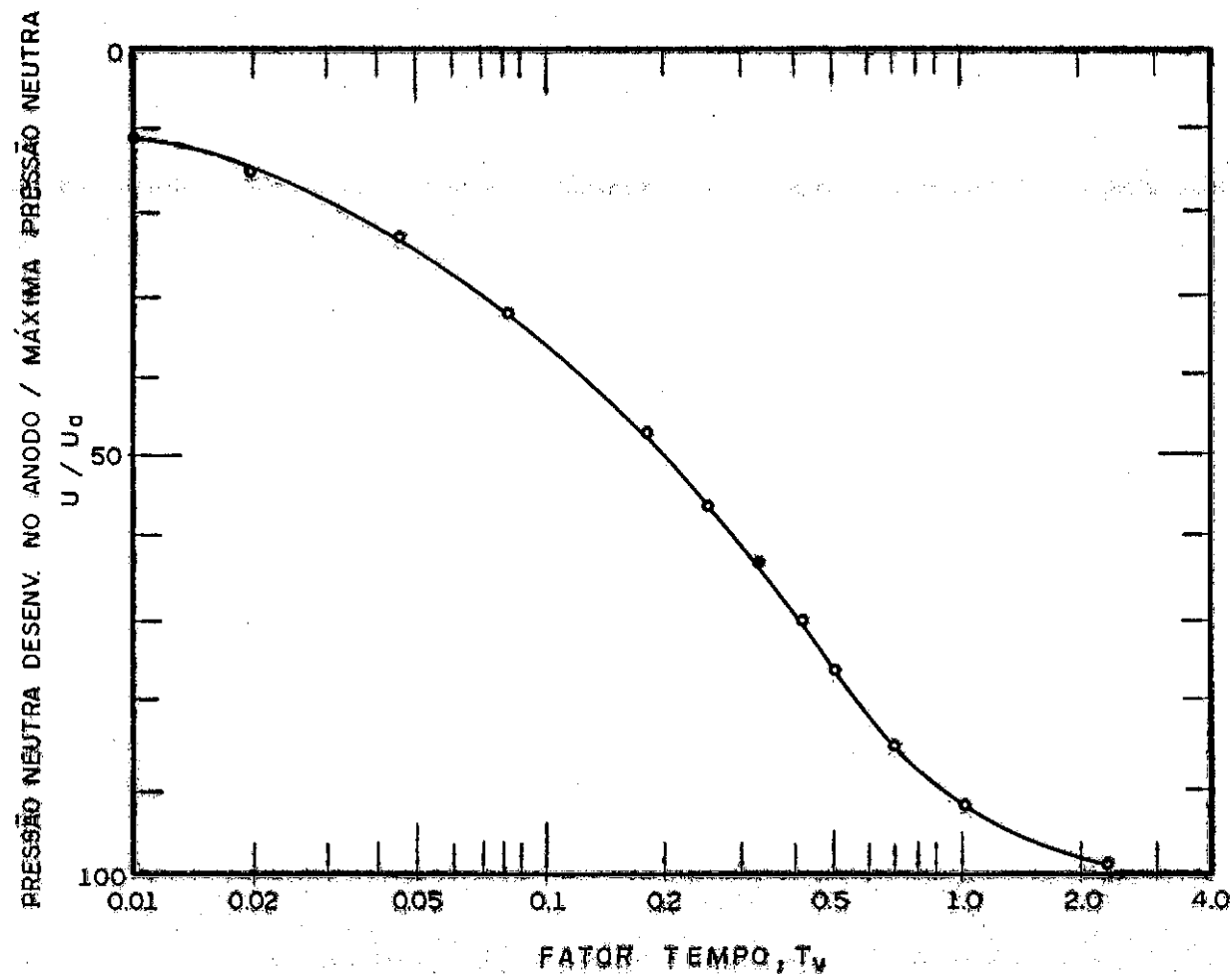


FIGURA 9 - DESENVOLVIMENTO DE PRESSÃO NEUTRA NO ANODO VERSUS FATOR TEMPO
(SEGUNDO WAN⁴³, 1970)

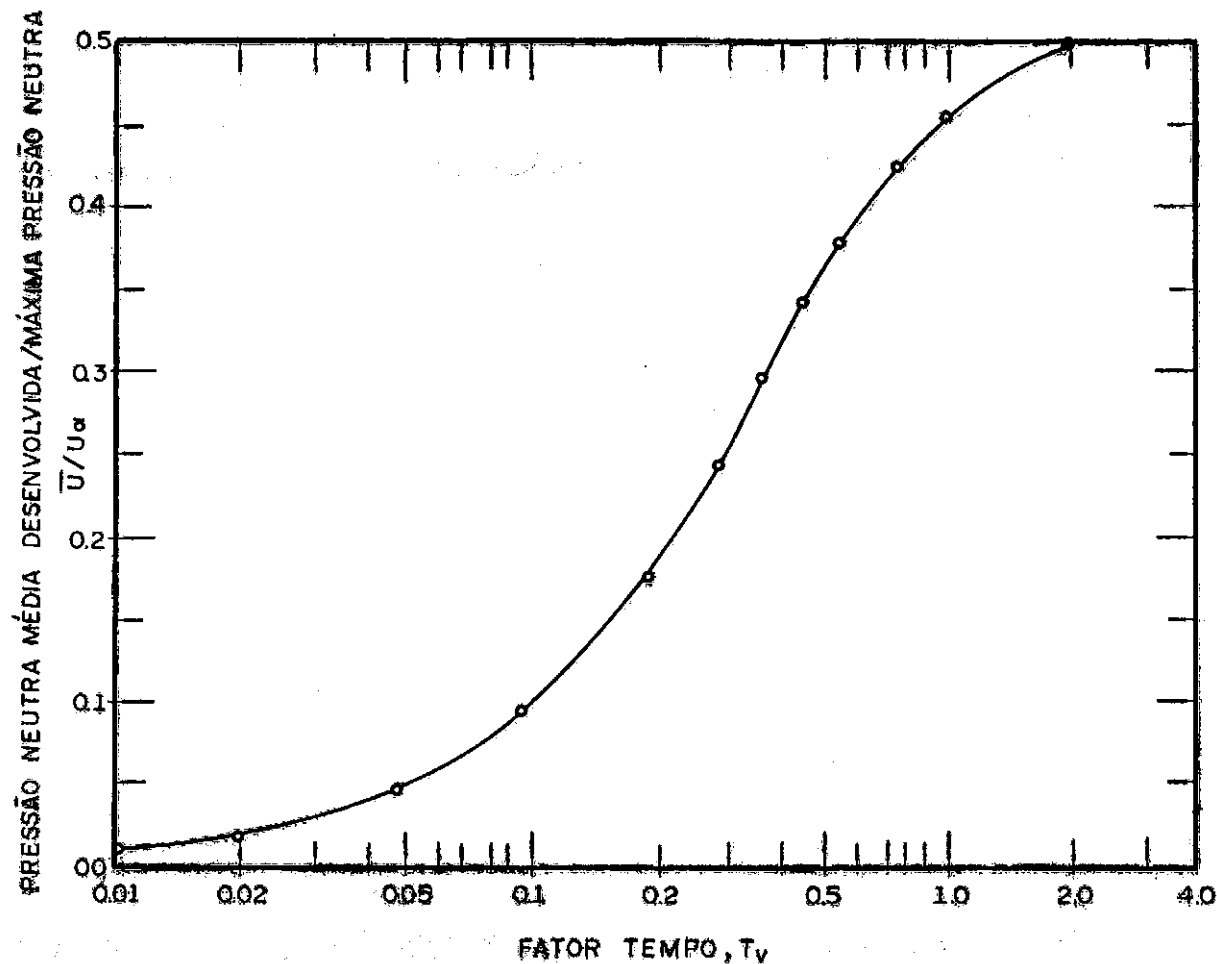


FIGURA 10 - DESENVOLVIMENTO DE PRESSÃO NEUTRA MÉDIA VERSUS FATOR TEMPO
(SEGUNDO WAN⁴³, 1970)

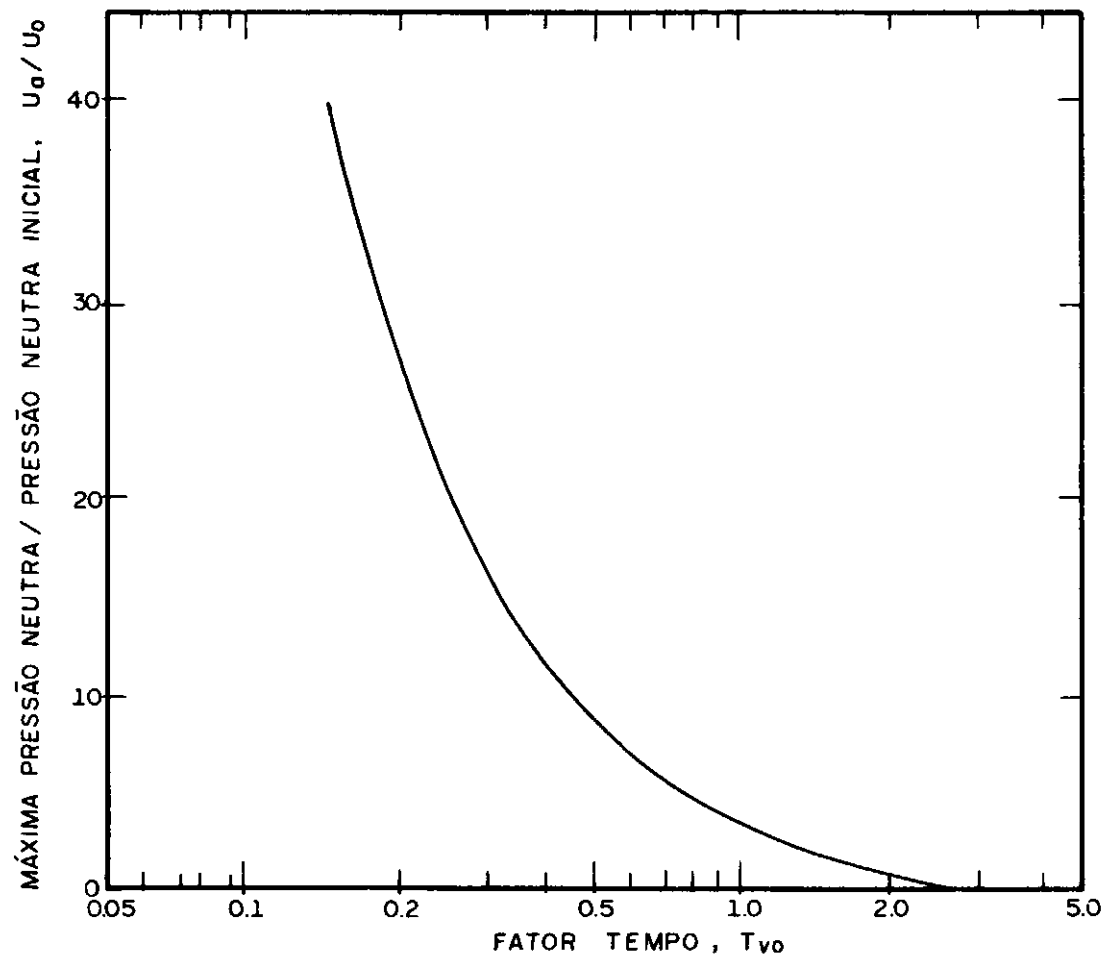


FIGURA II - FATOR TEMPO PARA O EXCESSO DE PRESSÃO NEUTRA INICIAL ATINGIR ZERO
(SEGUNDO WAN⁴³, 1970)

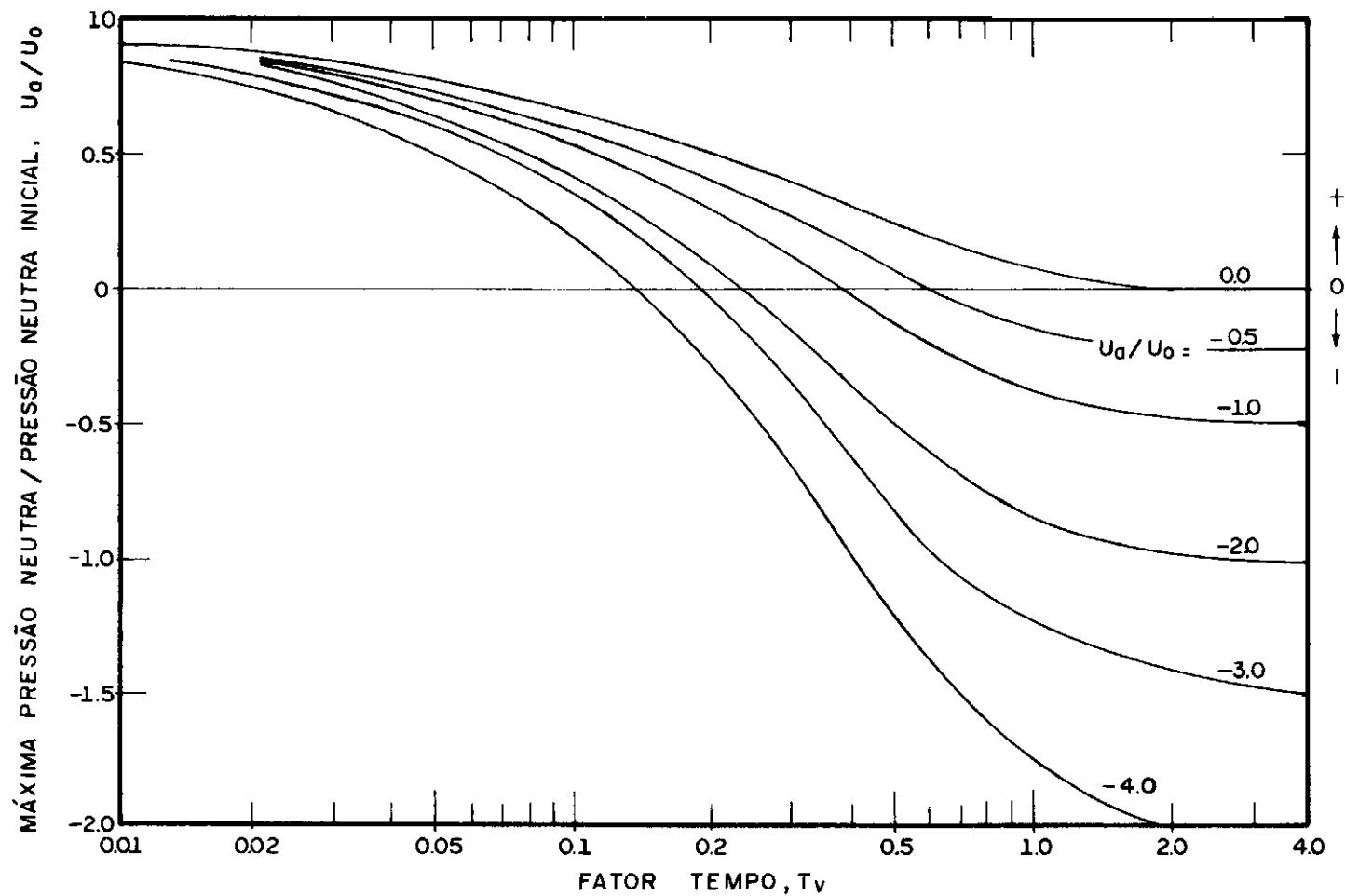
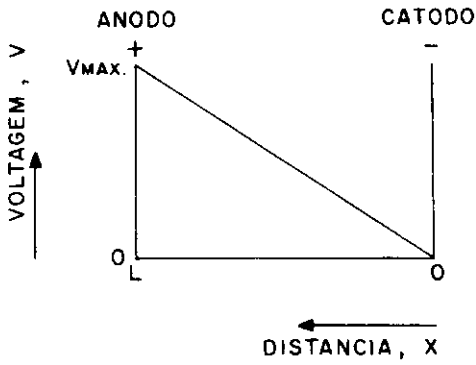
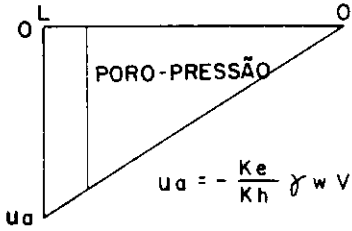
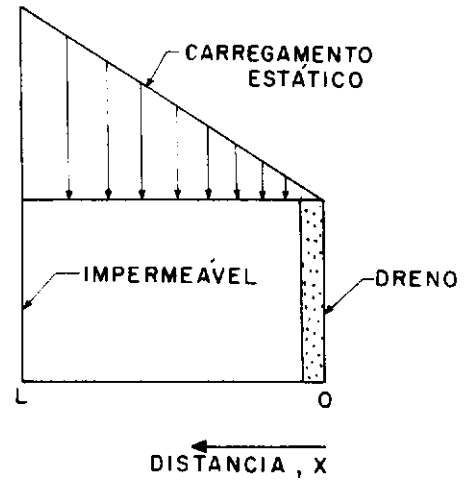


FIGURA 12 - RELAÇÃO ENTRE PRESSÕES NEUTRAS FINAL E INICIAL VERSUS FATOR TEMPO
(SEGUNDO WAN⁴³, 1970)



≡



≡

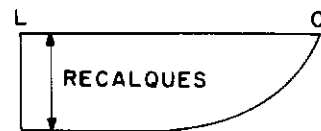
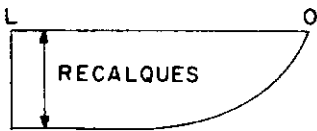


FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE ELETRO-DRENAGEM E ADENSAMENTO CONVENCIONAL (Segundo Mitchell³⁰, 1976)

O principal problema que deveria ser solucionado era o de curto-circuito. Isto porque, ao existir uma corrente elétrica contínua através da amostra de solo, poderia haver uma parte desta corrente que passasse externamente ao anel onde fica a amostra, indo ao encontro da que pelo interior do solo percola.

Desta forma, foi concebido um dispositivo que não só evitasse o curto-circuito, como também fuga de corrente, isto é, o campo elétrico deveria estar restrito ao solo ensaiado.

Com tal dispositivo, pode-se aplicar diferenças de potencial no topo e na base das amostras de solo, conseguindo-se, assim, um fluxo d'água correspondente ao adensamento dos solos ensaiados.

4.4.2 Construção

Ao contrário do eletro-permeâmetro, a construção da célula de eletro-drenagem foi de fácil execução, já que a parte básica deste equipamento é a utilizada em prensas convencionais de adensamento.

Assim sendo, apenas o anel, cabeçote ("top-cap"), eletrodos e placas de base, tiveram que ser confeccionados em oficina mecânica (Ronald Top - Rio de Janeiro).

A descrição destes e de outros elementos que compõem a célula de eletro-drenagem é feita no item a seguir.

4.4.3 A célula de Eletro-Drenagem

Como já foi dito anteriormente, este equipamento pode ser utilizado em prensas convencionais de adensamento. No caso, as prensas são fabricadas pela Wykeham - Farrance, Inglaterra. A Foto 7 mostra a célula de eletro-drenagem acoplada a prensa de adensamento.

Os elementos que fazem parte da célula em questão são mostrados na Foto 8, e descritos a seguir:

- Fonte Kepco (USA), de corrente contínua (nº 1, Foto 8);
- Placa de base (nº 2, Foto 8), de acrílico, com rebaixos de encaixe macho e fêmea. Os rebaixos têm por função melhor unir a célula propriamente dita (nº 3, Foto 8) com o pendural da prensa, e o acrílico isolar ele



FOTO 7 CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM E PRENSA DE ADENSAMENTO

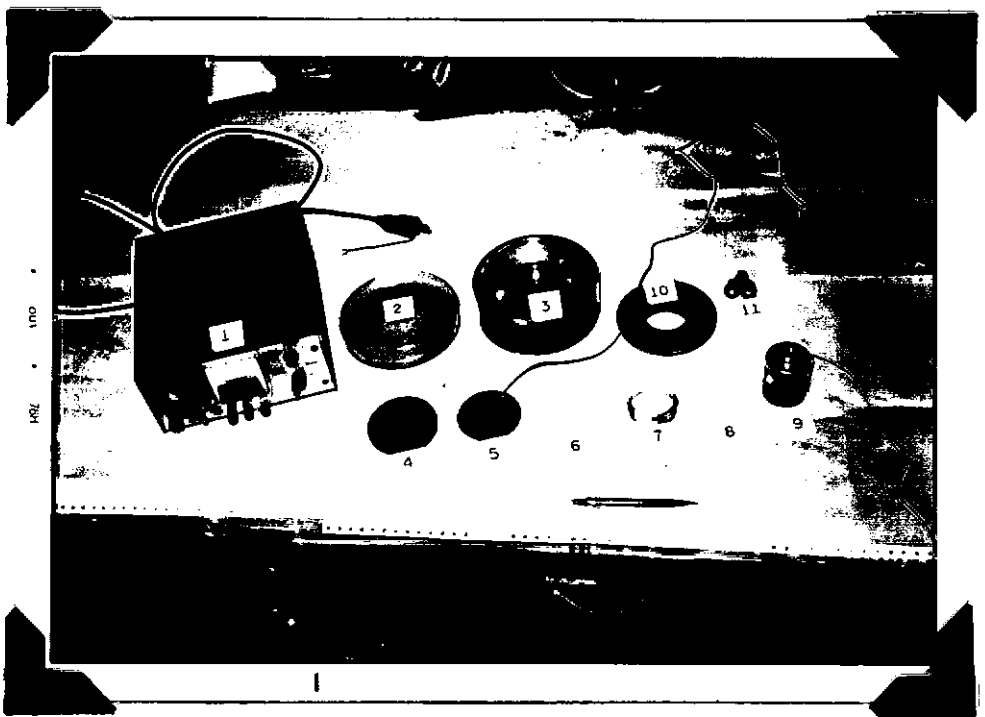


FOTO 8 COMPONENTES DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

tricamente o conjunto;

- Diâmetro (da placa) de 15,27cm, sendo sua altura de 2,07cm;
- Célula propriamente dita (nº 3, Foto 8), onde ficarão a amostra de solo e água. Faz parte do equipamento convencional de adensamento;
- Pedra porosa, com diâmetro de 5,08cm (nº 4, Foto 8);
- Placa perfurada de ferro, soldada a fio condutor (nº 5, Foto 8).

Esta placa é perfurada para dar passagem a água, e será o catodo (em nossos ensaios). Seu diâmetro é de 8,05cm, com espessura de 0,1cm.

- Papel filtro (nºs 6 e 8, Foto 8), com diâmetro da pedra porosa e do anel de acrílico (2");
- Anel de acrílico (nº 7, Foto 8), com ponta biselada, onde ficará a amostra de solo. O acrílico impedirá fuga de corrente elétrica e/ou curto-circuito. Sua altura é de 2cm, enquanto seu diâmetro é de cerca de 5cm ou 2 pol;
- Cabeçote (nº 9, Foto 8). Trata-se de um "top-cap" convencional, aparafusado a um cilindro de acrílico. Na base deste cilindro tem-se um rebaixo onde existe uma placa de ferro. Desta placa de ferro parte um fio condutor para a fonte Kepco. Note-se que o fio condutor penetra na parte mais superior do cilindro de acrílico, indo pelo seu interior até a placa metálica (anodo), a fim de que o cilindro possa penetrar livremente no anel, sem que o fio condutor interfira nesta penetração. Outro detalhe importante é que a placa metálica não tem contato com nenhum outro elemento condutor que não a amostra de solo, estando lateral e superiormente totalmente envolta pelo acrílico;
- Elemento de suporte (nº 10, Foto 8). Também é parte integrante do equipamento convencional de adensamento;
- Parafusos fixadores do elemento de suporte (nº 11, Foto 8).

Os números, ora citados, são sempre os mesmos nas fotos deste capítulo, e apresentam-se em ordem aproximadamente sequencial na montagem da célula de eletro-drenagem. A

sequência de montagem pode ser vista com maior detalhe nas Fotos 9, 10, 11, 12 e 13.

Como pode-se notar, o cabeçote não tem pedra porosa em sua base. Tal fato é explicado pelo sentido anodo - catodo tomado pelos fluxos d'água e corrente elétrica, que fazem com que não haja drenagem no anodo. Isto, porém, prejudica a interpretação de ensaios em que cargas estáticas sejam aplicadas a uma amostra na célula de eletro-drenagem, já que o fluxo d'água provocado por cargas estáticas terá sentido do catodo, mas também sentido da pequena abertura que existirá entre o "top-cap" e o anel. Desta forma, o equipamento desenvolvido não deve ser utilizado no cálculo dos parâmetros geotécnicos em ensaios com cargas estáticas, nem tampouco utilizado para interpretar resultados do uso simultâneo de cargas estáticas e diferenças de potencial elétrico.

A evidência de que existe fluxo d'água entre o cabeçote e o anel, quando da aplicação de cargas estáticas numa amostra de solo na célula de eletro-drenagem, pode ser vista colocando-se um medidor de PH (de papel especial que muda a coloração) nos orifícios de saída do elemento de suporte (nº 10, Foto 8).

Isto não quer dizer, porém, que não se possa previamente adensar estaticamente uma amostra de solo e, a seguir, aplicar um gradiente elétrico. A observação da curva tempo x recalque, devido ao carregamento estático, dirá quando os recalques terão se estabilizado e, daí, quando poderá ser aplicado o gradiente elétrico. Apenas a interpretação dos resultados devido às cargas estáticas é que se torna problemática.

Finalmente, deve-se evitar, para o equipamento em questão, o uso simultâneo de gradientes elétricos e hidráulicos (cargas estáticas), pelas razões já mencionadas, e também que a água de célula atinga o nível dos orifícios do elemento de suporte para que não haja curto-circuito.

4.5 Metodologia dos Ensaios Realizados

A pesquisa sobre eletro-drenagem fundamentou-se em três tipos de ensaios, que abrangem aspectos da compressão

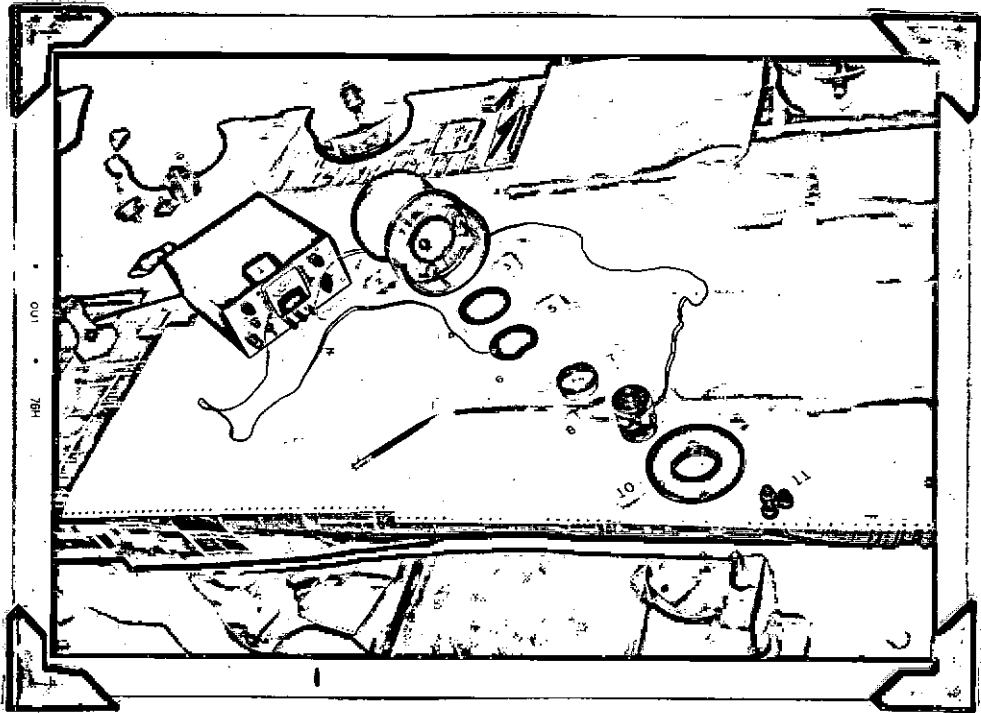


FOTO 9 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

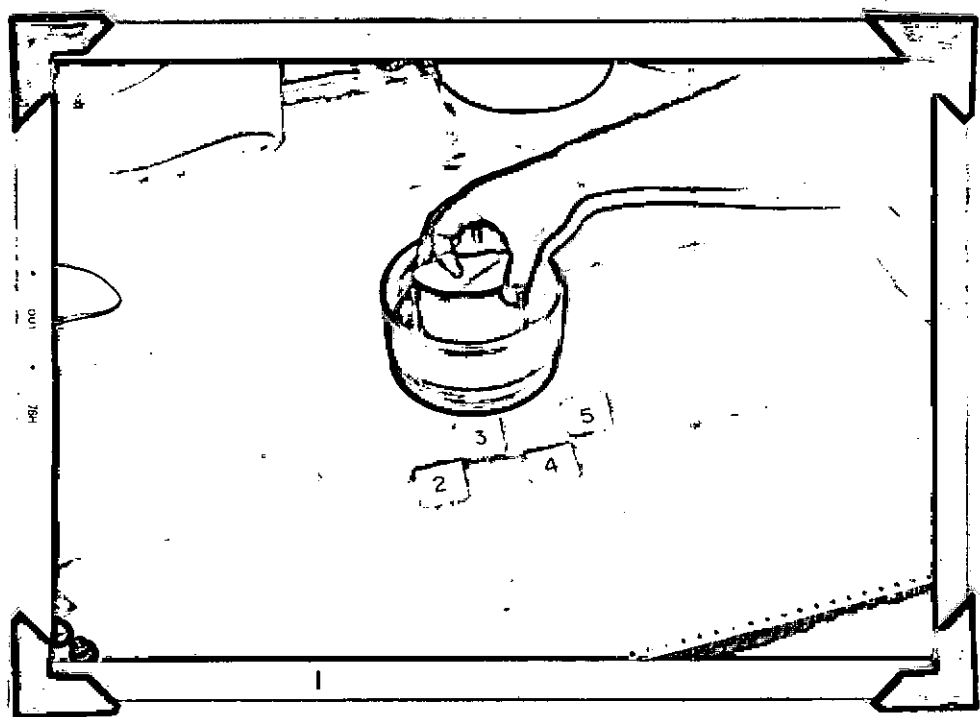


FOTO 10 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

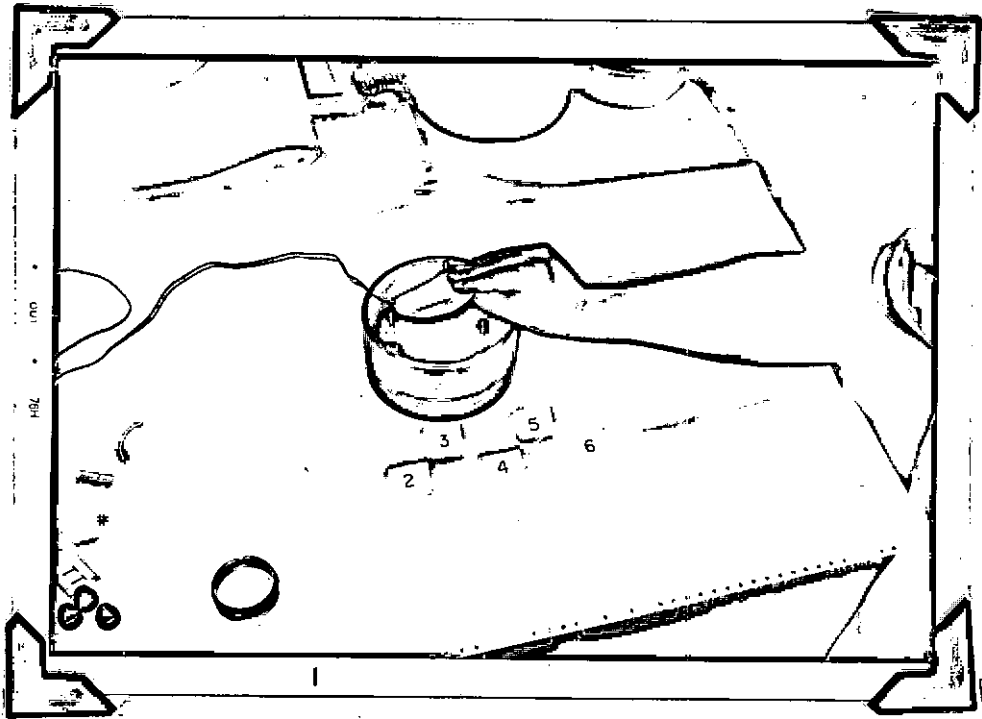


FOTO 11 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

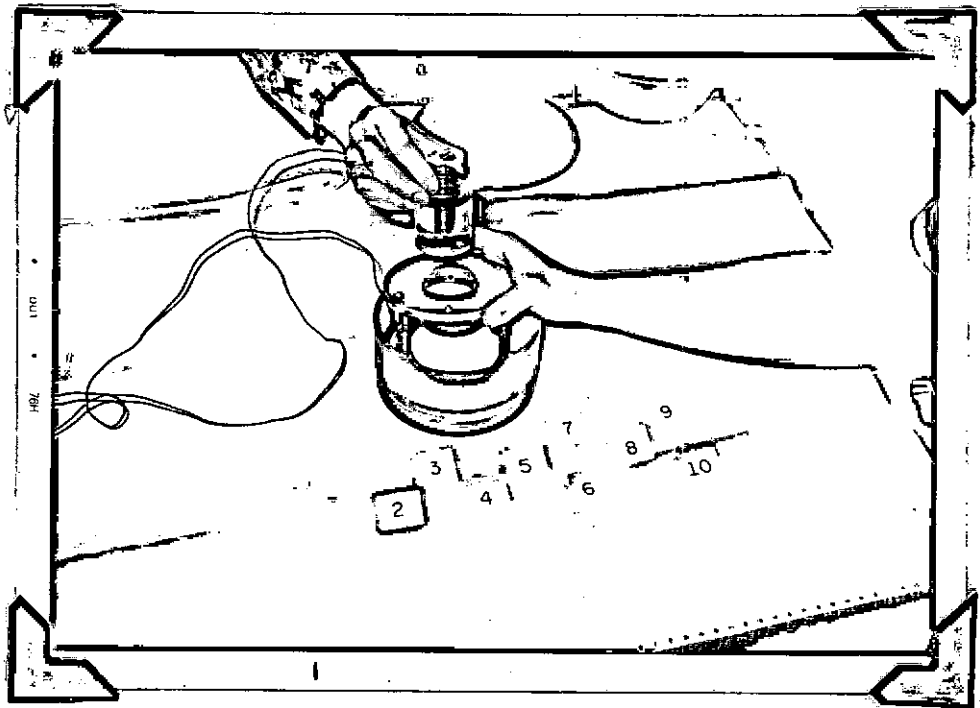


FOTO 12 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

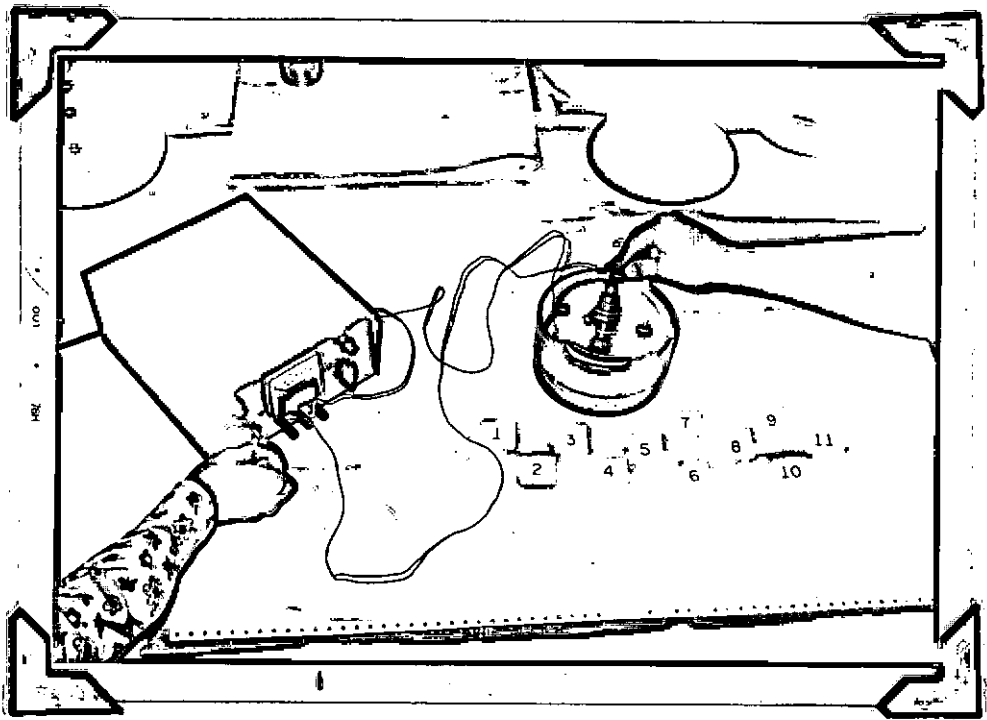


FOTO 13 SEQUÊNCIA DE MONTAGEM DA CÉLULA DE ELETRO-DRENAGEM

primária e da secundária. Nos itens subsequentes, é feito um detalhamento dos mesmos.

4.5.1 Ensaio Tipo 1

Nestes ensaios, diversas amostras de solo foram adensadas estaticamente a pressões de $0,125\text{kg/cm}^2$ e, a seguir, eletro-drenadas com diferenças de potencial de 2, 4, 8, 16 e 32 volts.

Com isto, procurou-se melhor conhecer os efeitos da voltagem no processo eletro-osmótico, como, por exemplo, saber-se qual a voltagem ótima, a partir da qual cai a eficiência do transporte de água e de cations adsorvidos.

Paralelamente a cada um destes ensaios, uma outra amostra, obtida do mesmo tubo amostrador de parede fina, foi adensada convencionalmente para que a pressão de pré-adensamento, índice de compressão, etc., fossem determinados. Nos ensaios em que houve eletro-drenagem, foi escolhida a pressão estática de $0,125\text{kg/cm}^2$, para daí aplicar-se voltagem, tendo em vista:

- Limitar os efeitos perturbadores do amolgamento, variável com as amostras extraídas;
- Não adensar substancialmente as amostras, diminuindo os teores de umidade, face aos altos gradientes elétricos empregados.

Os gradientes elétricos escolhidos partiram de um valor já consagrado (1 volt/cm ou ddp de 2 volts), até um máximo (16 volts/cm ou ddp de 32 volts) onde notou-se cavitação e perda de eficiência do processo, como será mostrado mais adiante.

Neste tipo de ensaio, não houve preocupação na determinação dos coeficientes de compressibilidade (Cv) e no de permeabilidade hidráulica (kh) durante a eletro-drenagem, determinação esta que será feita nos ensaios tipo 2, além do que a análise de tais parâmetros deve ser feita para amostras com diversos estágios de adensamento, e não é significativa no caso em que as amostras foram adensadas estaticamente a um único nível de pressão ($0,125\text{kg/cm}^2$), que, inclusive, está muito aquém da pressão de pré-adensamento.

Finalmente, o tempo de aplicação do gradiente elétrico, ao contrário dos demais tipos de ensaios, foi estipulado em 8h, motivado novamente pelas altas voltagens empregadas.

4.5.2 Ensaio Tipo 2

Nestes ensaios, diversas amostras foram adensadas estaticamente a diferentes níveis de pressão (2, 4 e 8kg/cm²) e, a seguir, eletro-drenadas com um gradiente elétrico de 1 volt/cm durante 24h.

Desta forma, diferentemente da sistemática estabelecida para os ensaios Tipo 1, pode-se determinar os valores de C_v , K_h e P'_{EQUIV} , durante a eletro-drenagem, em amostras adensadas estaticamente a diferentes pressões.

O termo P'_{EQUIV} , significa a pressão estática que produziria a mesma variação no índice de vazios, que a provocada por uma diferença de potencial elétrico.

Ensaio convencional de adensamento, em amostras extraídas do mesmo "shelby", foram também realizados simultaneamente com os ensaios onde houve eletro-drenagem. Por exemplo, quando uma amostra era adensada a 8kg/cm² e a seguir eletro-drenada, fazia-se ao mesmo tempo um ensaio convencional indo até 8kg/cm². Este procedimento possibilitou:

- Analisar simultaneamente o comportamento das duas amostras, em termos de curvas tempo x recalque e índice de vazios x pressão;
- Verificar qual a influência da drenagem pela parte superior da aparelhagem desenvolvida (onde não há pedra porosa, vide descrição da aparelhagem), quando da aplicação de cargas estáticas, já que durante a eletro-drenagem o fluxo é essencialmente no sentido do anodo (parte superior) para o catodo (parte inferior).
- Aumentar o número de determinações de C_v , K_h , etc., tanto durante a fase de carregamento estático, como na fase de eletro-drenagem. Mais ainda, por problemas de definição de altura da camada drenante na aparelhagem desenvolvida, os valores de C_v , K_h , etc, eram obtidos (para a fase de carregamento estático) de ensaios convencionais, já que existe fuga d'água entre o "top-cap"

e o anel de acrílico quando a aplicação de cargas estáticas em amostras a serem eletro-drenadas.

O gradiente elétrico utilizado (1 volt/cm) foi escolhido por ser valor de uso habitual em experiências deste tipo. O tempo de aplicação do gradiente elétrico foi estipulado em 24h, em conformidade com o tempo de aplicação de cargas estáticas, e face ao pequeno nível da voltagem aplicada (2 volts).

4.5.3 Ensaio Tipo 3

Estes ensaios, ao contrário dos demais, foram voltados para a compressão secundária. A metodologia empregada foi a seguinte:

- Três amostras, sendo duas em células de eletro - drenagem e uma célula convencional, foram adensadas a 4kg/cm^2 , estaticamente. Este valor foi escolhido de forma a que a amostra já estivesse na reta virgem de compressão primária, e que ainda houvesse um teor de umidade que não permitisse o ressecamento excessivo na região do anodo;
- Em duas das amostras aplicou-se um gradiente usual de 1 vlot/cm durante 24h, e mediram-se os valores de P'EQUIV. O valor médio foi então aplicado estaticamente à terceira amostra. As correntes elétricas e o carregamento estático correspondente à P'EQUIV médio foram desligadas e retirado, respectivamente;
- Durante cerca de 300 dias observou-se o comportamento das três amostras, sob carregamento estático de 4kg/cm^2 .

Evidentemente estes ensaios objetiveram notar quais as possíveis diferenças haveriam, na compressão secundária, entre amostras adensadas estaticamente e eletro-drenadas. Sendo a compressão secundária um fenômeno complexo, onde há compressibilidade do solo devido a possíveis rearranjos da estrutura e fugas de água adsorvida, porquanto as tensões efetivas permanecem aproximadamente constantes (segundo Coste & Sangleratt, ¹³1973), tem-se melhor noção da importância dos ensaios ora mencionados.

4.5.4 Ensaio Tipo 4

Como todos os ensaios anteriores foram realizados com argila mole, orgânica, tentou-se também a repetição da metodologia empregada nos ensaios tipos 1 e 2, em uma bentonita sódica de Pernambuco.

Por razões que serão melhor detalhadas no item 4.7, os ensaios neste material foram cancelados.

4.6 Características dos Solos Ensaçados

4.6.1 Local e Forma de Coleta

Como os ensaios com bentonita sódica foram cancelados, será dada apenas atenção à argila mole, orgânica. Contudo, a título de maior informação, vale acrescentar que existem basicamente 2 tipos de bentonita à venda; a bentonita sódica e a bentonita cálcica. Em termos de espessura da dupla-camada difusa e de trocabilidade de cations, os maiores valores são os da bentonita sódica, razão pela qual esta montmorilorida foi a escolhida.

A argila orgânica foi coletada do subsolo da Av. Presidente Vargas, no Rio de Janeiro, conforme planta e perfil constantes da Fig. 14. A cava do Metropolitano já havia chegado à cota aproximada de (-) 8m, tendo sido transpostas as camadas de aterro e areia fofa, faltando ainda completar mais 2m de escavação em argila orgânica para que a cota de projeto fosse atingida. Foi então feita, com ajuda de operários e engenheiros do Metropolitano, uma cava com profundidade e largura de cerca de 1m, e no fundo desta foram cravados amostradores de parede fina tipo "shelby", com diâmetro de 7,62cm. As amostras, após a retirada do subsolo, foram parafinadas e levadas para a camada úmida do laboratório de solos da COPPE/UFRJ.

4.6.2 Características da Argila Orgânica

Vilela⁴² (1976), analisando um depósito de argila mole muito próximo ao local da Fig. 14, chegou às seguintes conclusões:

- O depósito é composto de um mesmo tipo de argila, porém em diferentes porcentagens em cada profundidade;
- A porcentagem de matéria orgânica é inferior a 4%;

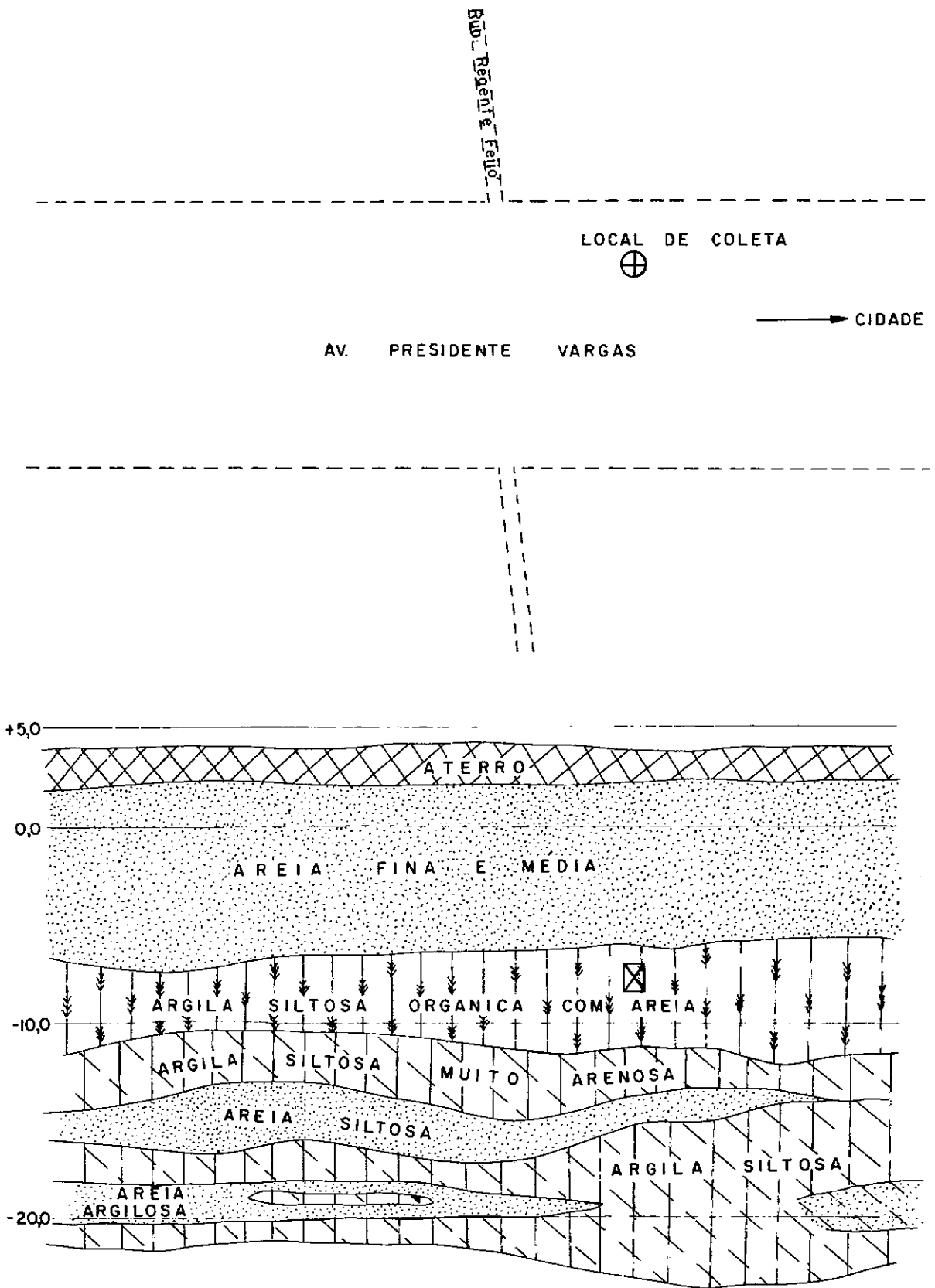


FIGURA 14 CROQUIS DE LOCALIZAÇÃO DA RETIRADA DE ARGILA ORGÂNICA

- A sensibilidade é média, variando em torno dos valores 2 e 3;
- A atividade coloidal, isto é, o índice de plasticidade dividido pela fração argilosa coloidal, situa-se entre 1,1 a 1,4;
- A granulometria média é de: 50% de argila, 30% de silte e 20% de areia;
- A densidade dos grãos está entre 2,59 a 2,69, o peso específico úmido é de $1,6t/m^3$, o limite de liquidez é de 70%, o limite de plasticidade é de 30% e a umidade natural situa-se por volta de 60%;
- A resistência não drenada varia de 0,2 a $0,8kg/cm^2$, sendo que coesão e ângulo de atrito efetivos variam de 0,2 a $0,3kg/cm^2$ e 22° a 31° , respectivamente;
- Para o adensamento, C_c varia entre 0,7 e 1,1, C_v está em torno de $10^{-4}cm/s$ e K_h ao redor de $10^{-8}cm/s$.

A sondagem B-5, mostrada na Fig. 16, e realizada pela Cia do Metropolitano¹¹ (1970), apresenta os seguintes resultados para profundidades semelhantes à da coleta dos "shelbies" para esta pesquisa:

- "Standard Penetration Test" (SPT) entre 0 e 5 golpes;
- Atividade coloidal entre 1,15 e 1,30;
- Granulometria: 40% a 58% de argila, 30% a 45% de silte e 5% a 30% de areia;
- Densidade dos grãos entre 2,50 e 2,64, peso específico úmido entre 1,57 e $1,63t/m^3$, limite liquidez de 69 a 90%, limite de plasticidade de 20 a 30% e umidade natural de 53 a 75%;
- Resistência não drenada de 0,2 a $0,54kg/cm^2$, coesão efetiva de $0,36 kg/cm^2$, ângulo de atrito efetivo de 11° ;
- Teor de matéria orgânica entre 0,26 e 0,40, e teor de $CaCO_3$ de 1,78 a 2,53;
- No adensamento, C_c entre 0,59 e 0,83, C_s entre 0,10 e 0,18, pressão de pré-adensamento de 0,55 a $1,40kg/cm^2$ e grau de saturação de 95 a 99%.

Os valores já citados, bastantes semelhantes entre si, alinham-se também aos obtidos nesta pesquisa, onde foram obtidos os seguintes valores médios:

- Densidade dos grãos de 2,68;
- Granulometria: argila 45%, silte 25% e areia 30%;
- Limite de liquidez 75%, limite de plasticidade de 28% e índice de plasticidade 44%;
- Outros valores encontram-se na apresentação dos resultados do item 4.7;
- O mineral argílico predominante, segundo ensaios de raio-X, é a caolinita, sendo que para a realização deste ensaio recomenda-se que a amostra esteja a mais pulverizada possível.

4.7 Resultados dos Ensaaios Realizados

4.7.1 Ensaaios Tipo 1

Na tabela 5, é mostrado um quadro geral de resultados dos ensaios em questão. Como todas as amostras ensaiadas nesta etapa provieram do mesmo "Shelby", um ensaio de adensamento convencional também foi feito, a fim de que se pudesse ter certeza que as amostras obtidas tinham características semelhantes às obtidas por Vilela^{4,2} (1976) e pela Cia. do Metropolitano do Rio de Janeiro, isto é, não estavam excessivamente amolgadas pela abertura da cava de fundação do Metrô.

Os resultados do ensaio convencional são mostrados, ainda, pelas Figs. 15 e 16. Como pode ser observado, os resultados estão perfeitamente coerentes com os apresentados no item 4.6, à exceção do teor de umidade que é ligeiramente inferior.

Nos demais ensaios, onde houve eletro-drenagem, além da constatação de que seus parâmetros estão coerentes com os do ensaio convencional e item 4.6, interessantes observações puderam ser feitas, principalmente quando da passagem de corrente elétrica pelo interior da amostra, como mostrado a seguir.

As curvas tempo versus recalque, quando da eletro-drenagem, são mostradas nas Figs 17 e 18, em termos de altura do corpo de prova e deformação específica, respectivamente. Nestas curvas pode-se notar que quanto maior o gra

TABELA 5

QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS ENSAIOS TIPO 1

ENSAIO	GRAU DE SATURAÇÃO INICIAL S_i (%)	PESO ESPECÍFICO ÚMIDO INICIAL γ_h (t/m ³)	PESO ESPECÍFICO SECO INICIAL γ_s (t/m ³)	ÍNDICE DE VAZIOS INICIAL e_0	UMIDADE INICIAL w_i (%)	UMIDADE FINAL NO ANODO $w_f +$ (%)	UMIDADE FINAL NO MEIO AMOSTRA w_f (%)	UMIDADE FINAL NO CATÓDO $w_f -$ (%)	ÍNDICE DE COMPRESSÃO C_c (cm ² /Kg)	PRESSÃO DE PRE-ADENSAMENTO P'_{p0} (Kg/cm ²)
AMOTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm ²	86	1,70	1,24	1,20	37	—	29	—	0,42	1,25
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 0,125 Kg/cm ² E, A SEGUIR ELETRO- DRENADA COM 1,05 Volts/cm	93	1,71	1,14	1,39	48	46	47	50	—	—
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 0,125 Kg/cm ² E, A SEGUIR ELETRO- DRENADA COM 2,10 Volt/cm	91	1,70	1,16	1,39	47	39	45	51	—	—
AMOTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 0,125 Kg/cm ² E, A SEGUIR ELETRO- DRENADA COM 4,20 Volt/cm	100	1,85	1,36	1,10	37	28	31	38	—	—
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 0,125 Kg/cm ² E, A SEGUIR ELETRO- DRENADA COM 8,40 Volt/cm	89	1,85	1,42	1,05	32	26	30	33	—	—
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 0,125 Kg/cm ² E, A SEGUIR ELETRO- DRENADA COM 16,80 Volt/cm	90	1,84	1,41	1,05	31	28	29	32	—	—

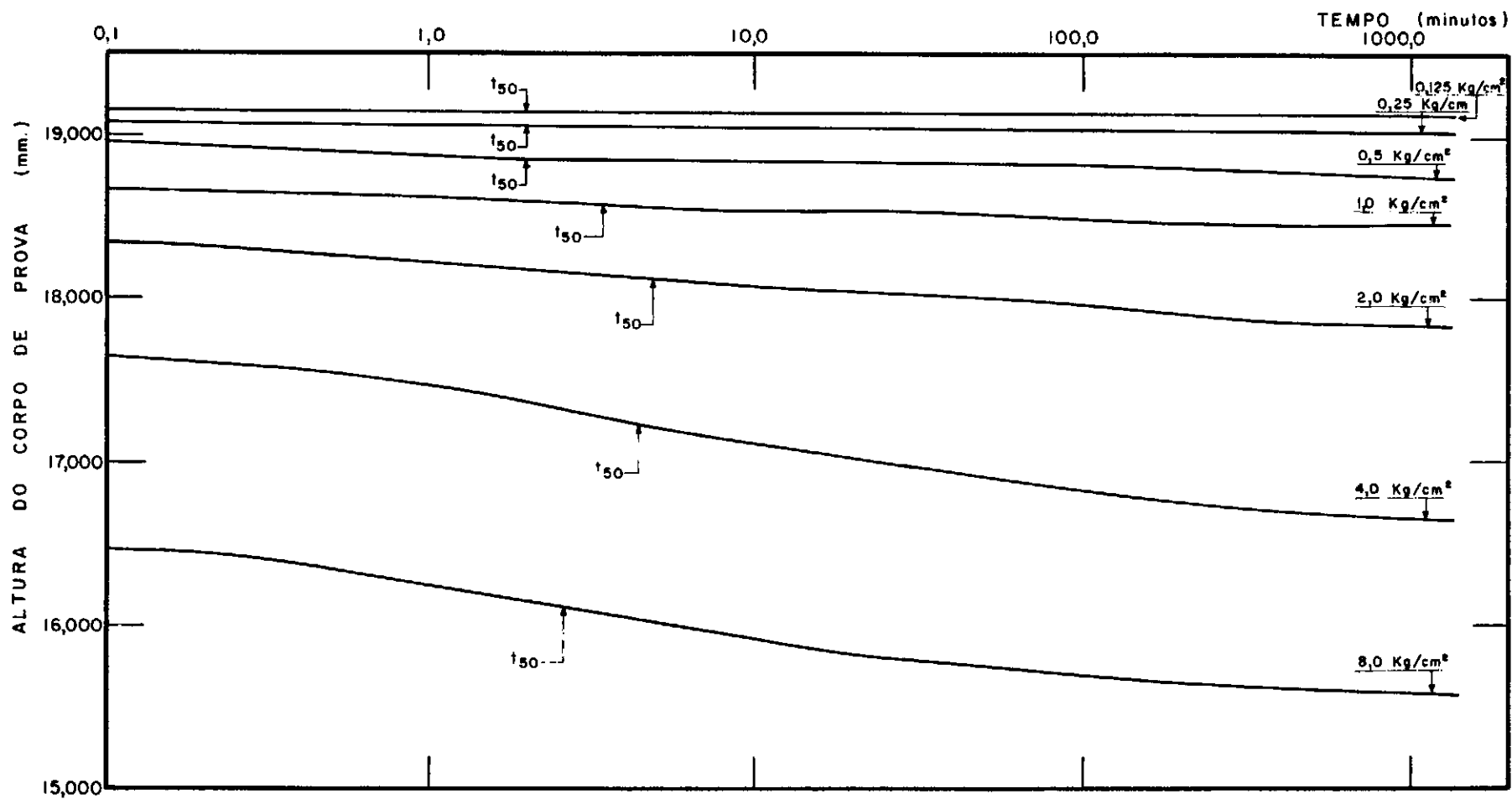


FIGURA 15 - CURVAS TEMPO VERSUS ALTURA DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIO CONVENCIONAL

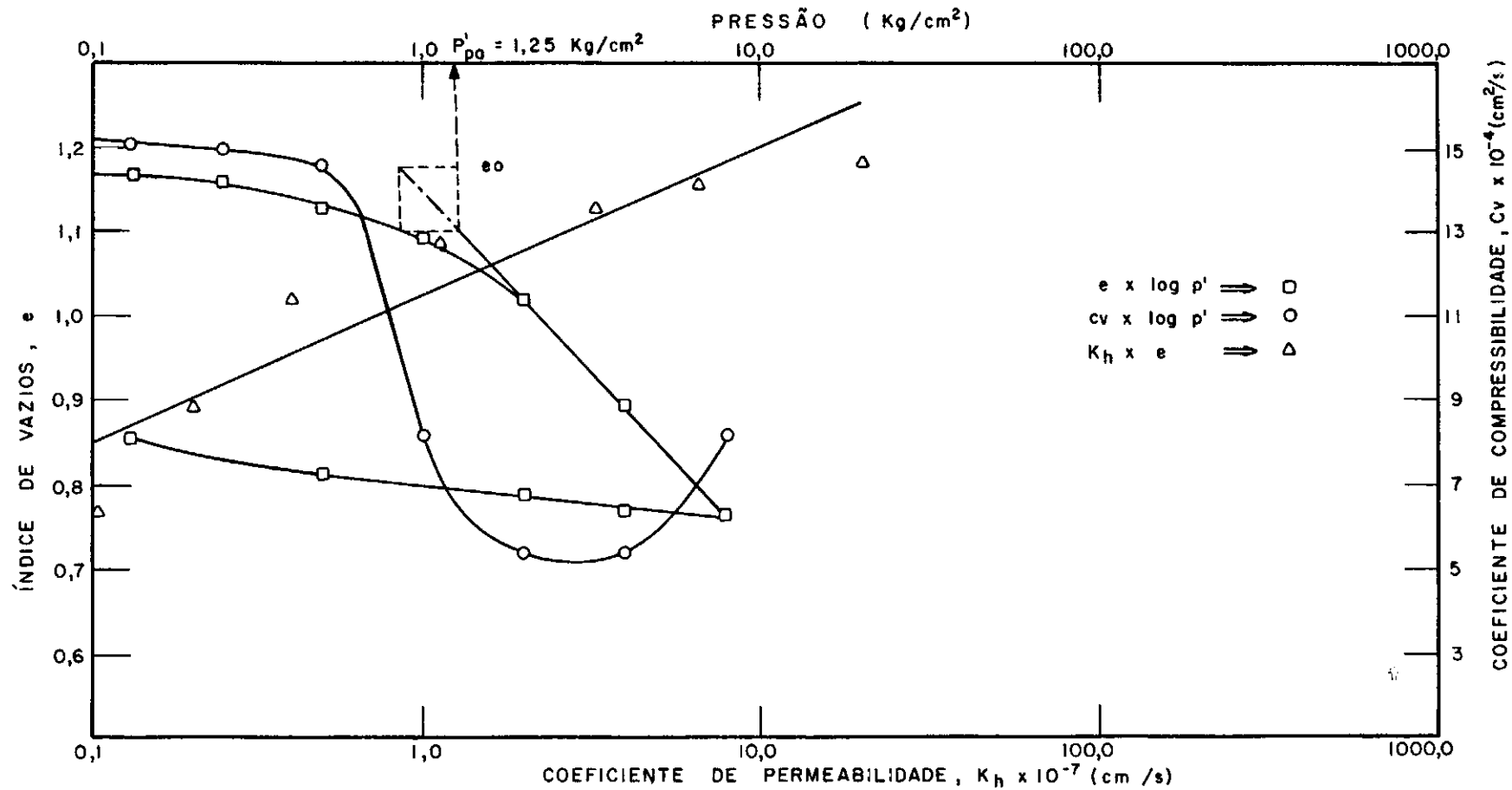


FIGURA 16 - RELAÇÕES PRESSÃO VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS, PERMEABILIDADE VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS E COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE VERSUS PRESSÃO, PARA ENSAIO CONVENCIONAL

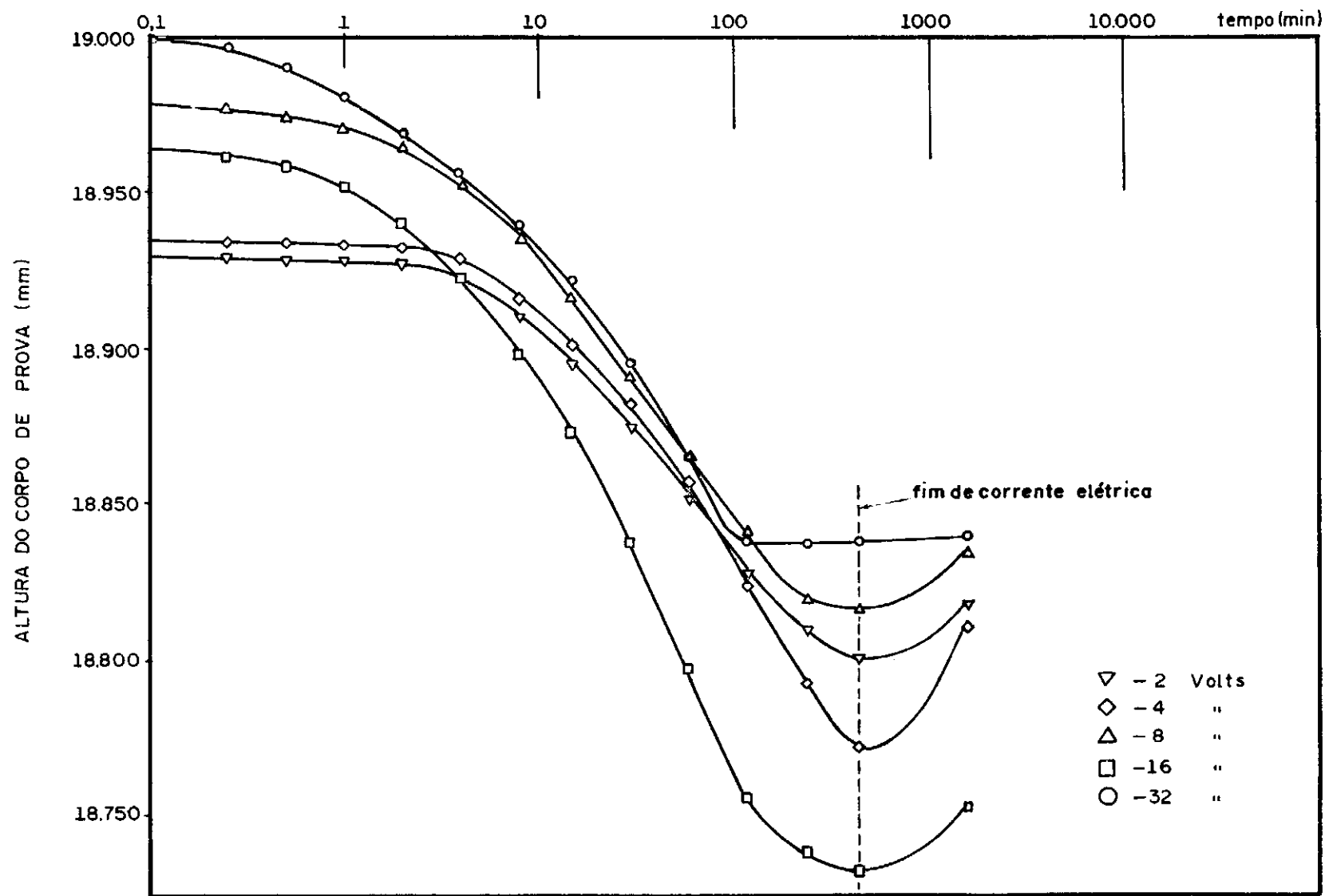


FIGURA 17 - ALTURA DO CORPO DE PROVA VERSUS TEMPO PARA DIVERSAS VOLTAGENS

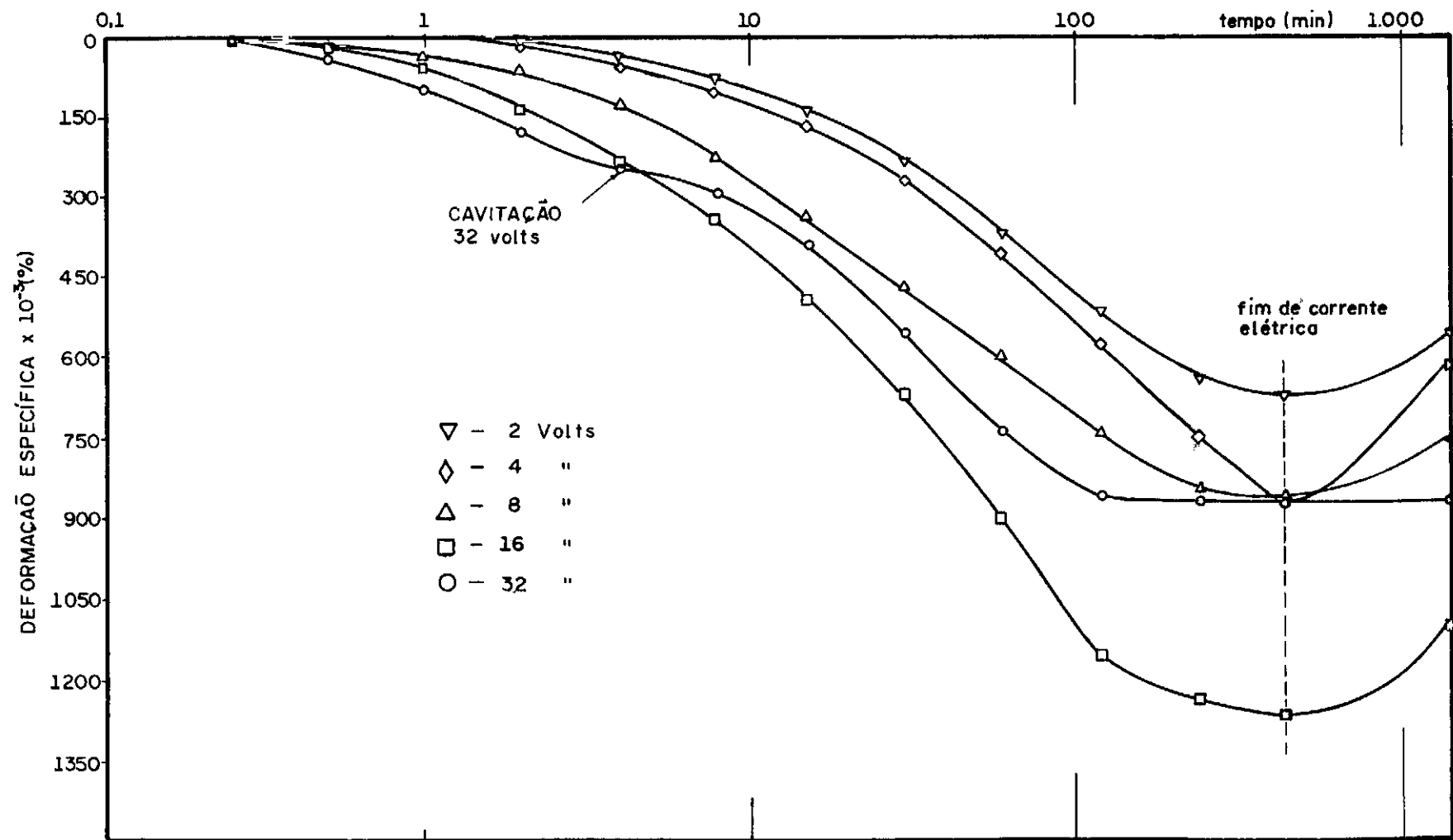


FIGURA 18 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA VERSUS TEMPO PARA DIVERSAS VOLTAGENS

diante elétrico maiores serão os recalques, o que é explicado pelo fato de que o gradiente elétrico equivale a uma sobrecarga estática, com a vantagem adicional de não causar a rotura do solo. Outro aspecto importante foi a cavitação da água intersticial, conforme mostrado na Fig. 18, na amostra submetida a uma diferença de potencial de 32 volts ou gradiente de 16 volts/cm, onde a curva inflete rapidamente para a direita com cerca de 5 minutos de ensaio. Esta cavitação foi acompanhada por "borbulhamento" d'água, perceptível visualmente.

O fato da água cavitatar sugere a idéia de que existe uma voltagem ótima, a partir da qual o processo de eletro-drenagem fica prejudicado por força da cavitação, triticamente, aquecimento e consequente aumento da resistência elétrica do meio argiloso. Tal fato pode ser melhor visto através da Fig. 20, onde as deformações específicas aumentam com o gradiente elétrico até 8 volts/cm (mesmo a diminuição do teor de umidade e do índice de vazios), e diminuem, a seguir, embora o gradiente elétrico seja duplicado e não haja variação no teor de umidade e do índice de vazios inicial. Os valores dos teores de umidade (w) e índice de vazios inicial (e_0) estão também plotados na figura em questão, a fim de que as informações acima sejam melhor visualizadas.

Ainda com relação as curvas tempo versus recalques, quando da eletro-drenagem, suas formas são semelhantes às de curvas convencionais de adensamento, inclusive existindo inchamento após o término da aplicação de voltagem. Este fato reforça ainda mais as semelhanças entre eletro-drenagem e adensamento convencional provocado por carregamento estático, o que será melhor detalhado nos ensaios tipo 2. Com relação à variação dos teores de umidade, a Fig. 19 mostra uma considerável redução no anodo e um aumento no catodo, devido ao sentido do fluxo d'água e cations. A homogeneidade das curvas indica que os ensaios tiveram comportamento semelhante e que, praticamente, nenhuma variação na umidade no anodo foi conseguida após um gradiente de 8 volts/cm.

Finalmente, não se notou durante a eletro-drenagem fuga d'água pelo anodo. Medidores de PH tipo "Merck", localizados

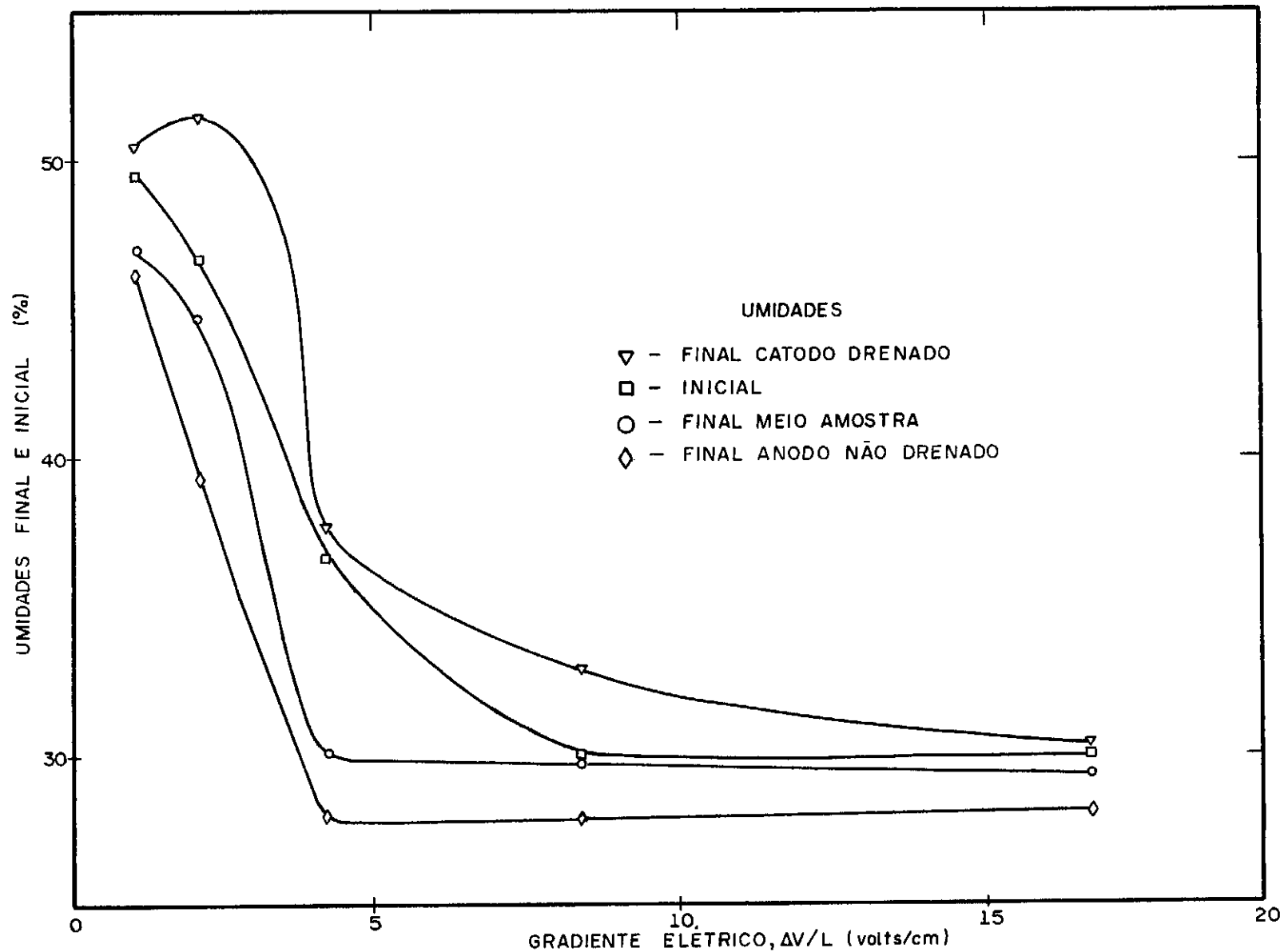


FIGURA 19 - RELAÇÃO DE UMIDADES VERSUS GRADIENTE ELÉTRICO

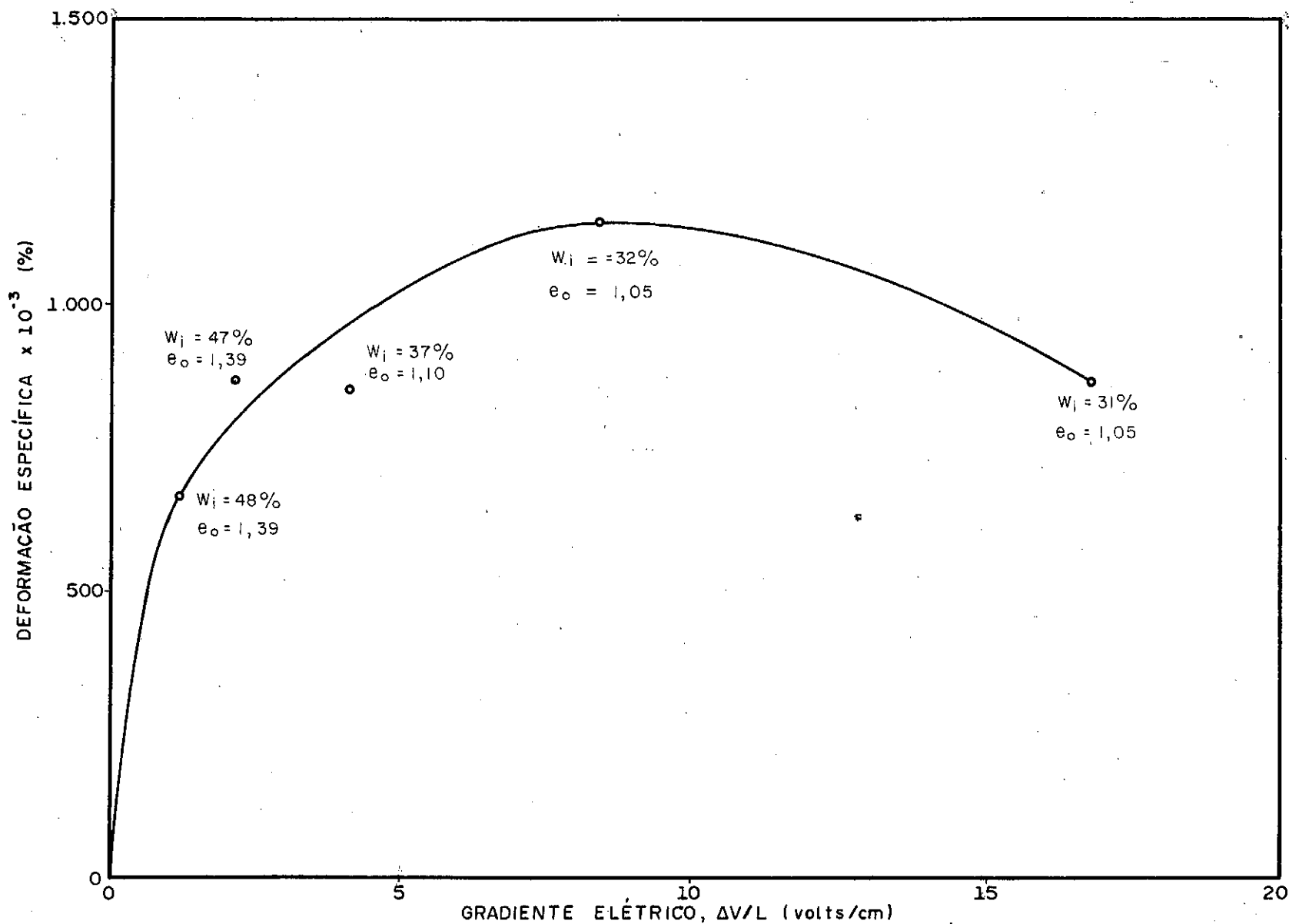


FIGURA 20 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA TOTAL VERSUS GRADIENTE ELÉTRICO

nas possíveis saídas d'água superiores, nada acusaram, isto é, se houvesse saída de fluído o medidor acusaria um PH ácido, conforme prescrito por Esrig¹⁷ (1968). Esta providência teve por objetivo verificar se a água dos poros, ainda sobre efeito do carregamento estático anterior, prejudicaria ou não o sentido do fluxo anodo para catodo durante a eletro-drenagem.

4.7.2 Ensaio Tipo 2

A Tabela 6 mostra o quadro geral de resultados dos ensaios tipo 2. Como pode ser visto, os parâmetros obtidos são bastante semelhantes aos dos itens 4.6 e 4.7.1, o que comprova uma certa homogeneidade desta argila orgânica. Da mesma forma que no item anterior, durante a eletro-drenagem houve um ressecamento no anodo e um "empapamento" no catodo, havendo diferenças entre $W_f +$ e $W_f -$ de 1 a 8%, que tendem a diminuir a medida que as amostras vão sendo mais adensadas estaticamente; ou seja, uma amostra adensada a $2,0\text{kg/cm}^2$ e, a seguir, eletro-drenada a diferença é de 8%. Noutra amostra adensada a 8kg/cm^2 e posteriormente submetida à eletro-drenagem o percentual difere apenas de 1%.

Foram repetidos os ensaios em amostras previamente adensadas estaticamente a $2,0\text{kg/cm}^2$ (inclusive os ensaios convencionais paralelos), a fim de que se pudesse ter maior certeza do comportamento da curva $e \times \log p'$ nas proximidades da reta virgem, face ao valor da pressão de pré-adensamento estar próximo a $2,0\text{kg/cm}^2$, o que dificulta a determinação do valor do índice de compressão e, obviamente, da própria reta virgem.

Outra repetição foi também efetuada nas amostras previamente adensadas estaticamente a $8,0\text{kg/cm}^2$, devido ao comportamento da amostra (que seria ainda eletro-drenada) na curva $e \times \log p'$ à altura de $1,5\text{kg/cm}^2$ (estáticos).

As pressões de pré-adensamento situam-se em torno de 1kg/cm^2 , o que fez com que todas as amostras fossem eletro-drenadas no estado de "normalmente adensado", ao contrário dos ensaios tipo 1, onde os corpos de prova, por motivos já expostos, estavam em estado de "pré-adensamento".

Os valores do índice de compressibilidade variam de 0,54 a 0,61. Aplicando-se a bem conhecida fórmula de Skempton

TABELA 6

QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS ENSAIOS TIPO 2

ENSAIO	GRAU DE SATURAÇÃO INICIAL S_i (%)	PESO ESPECÍFICO ÚMIDO INICIAL γ_h (t/m ³)	PESO ESPECÍFICO SECO INICIAL γ_s (t/m ³)	ÍNDICE DE VAZIOS INICIAL e_0	UMIDADE INICIAL w_i (%)	UMIDADE FINAL NO ANODO w_f (%)	UMIDADE FINAL MEIO AMOSTRA w_f (%)	UMIDADE FINAL DO CATODO w_f (%)	ÍNDICE DE COMPRESSÃO C_c (cm ² /Kg)	PRESSÃO DE PRÉ- ADENSAMENTO P'_{po} (Kg/cm ²)	PRESSÃO EQUIVALENTE À APLICAÇÃO DE VOLTAGEM P'_{equiv} (Kg/cm ²)	SÍMBOLO DO ENSAIO NOS GRÁFICOS
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (1º ENSAIO)	96	1,66	1,08	1,55	54	38	40	46	0,60	1,1	1,1	Δ
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2,0 Kg/cm ² (1º ENSAIO)	100	1,83	1,01	1,65	62	—	46	—	0,60	0,95	—	▲
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (2º ENSAIO)	96	1,65	1,06	1,56	55	42	46	48	0,60	1,2	0,8	▽
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2,0 Kg/cm ² (2º ENSAIO)	98	1,61	1,00	1,69	62	—	51	—	0,60	0,9	—	▼
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm	91	1,59	1,03	1,60	54	32	37	37	0,61	1,1	1,1	□
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4,0 Kg/cm ²	96	1,65	1,07	1,50	54	—	39	—	0,59	1,0	—	◻
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (1º ENSAIO)	94	1,64	1,09	1,46	51	32	33	35	0,60	1,4	0,9	○
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm ² (1º ENSAIO)	92	1,65	1,12	1,39	48	—	33	—	0,56	1,0	—	◉
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (2º ENSAIO)	95	1,67	1,12	1,40	49	31	32	32	0,54	0,9	1,2	◊
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm ² (2º ENSAIO)	94	1,66	1,11	1,42	50	—	38	—	0,59	1,1	—	◆

para argila indeformadas, .

$$C_c = 0,009 (LL - 10\%) \quad (22)$$

e o valor médio obtido para o limite de liquidez nestas pesquisas, obtem-se:

$$C_c = 0,009 (75\% - 10\%) = 0,585$$

o que está perfeitamente coerente com o exposto na Tabela 6.

Convém ainda observar, que os valores da pressão de pré-adensamento foram obtidos pelo método de Pacheco Silva, on de na curva e x $\log p'$:

- Prolonga-se a reta de virgem até uma horizontal passando pelo índice de vazios inicial;
- Traça-se a partir da interseção acima uma reta vertical até a curva e x $\log p'$ propriamente dita;
- Deste novo ponto é traçada uma nova reta horizontal até interceptar-se a reta virgem, obtendo-se então o valor de p'_{pa} .

Ainda com relação a Tabela 6, os valores de p'_{equiv} , tal qual as pressões de pré-adensamento, situam-se próximos a 1 kg/cm^2 . P'_{equiv} significa a carga estática que provoca a mesma variação do índice de vazios obtida durante a eletro-drenagem. Valores bastante próximos foram obtidos pelo U.S. Corps of Engineers (vide bibliografia 49.3 em Casagrande⁸, 1957) numa argila orgânica do aeroporto de La Guardia nos Estados Unidos, para gradiente elétrico de $0,40 \text{ Volts/cm}$ e um nível de pressão estática indo até $1,0 \text{ kg/cm}^2$. Casagrande⁹ (1960) obteve o valor de p'_{equiv} de $1,5 \text{ kg/cm}^2$ usando um gradiente de $0,5 \text{ Volts/cm}$ numa argila de Michigan (U.S.A.).

Desta forma, pode-se com bastante certeza afirmar que a aplicação de um gradiente de 1 Volt/cm equivale nesta argila orgânica a uma sobrecarga estática de aproximadamente 1 kg/cm^2 .

Sob o ponto de vista teórico, o valor de p'_{equiv} poderia ser estimado da seguinte forma para os ensaios tipo 2 :

$$u_a = \frac{\Delta V \times K_e \times \gamma_w}{K_h} \quad (23)$$

onde,

onde,

u_a = máxima pressão neutra induzida no anodo

ΔV = voltagem

K_e = coeficiente de permeabilidade eletro-osmótica

K_h = coeficiente de permeabilidade hidráulica

γ_w = peso específico da água

sendo,

$\Delta v = 2$ volts

$$u_a = \frac{5 \times 10^{-5} \times 10^{-3}}{10^{-7}} = 1,0 \text{ kg/cm}^2$$

o que evidencia, de sobremodo, os resultados aqui obtidos para esta argila orgânica do Rio de Janeiro.

As curvas tempo versus recalque para os ensaios tipo 2 encontram-se nas Figs. 21 a 30, merecendo destaque os seguintes fatos :

- Os valores de t_{50} , tanto para ensaios convencionais como para os carregamentos estáticos em amostras a serem eletro-drenadas, situam-se entre 1 e 15 minutos. Assim, os valores de t_{50} não parecem modificar-se mesmo quando há fuga d'água pelo espaço entre o cabeçote e a amostra na célula de eletro-drenagem, o que equivale a dizer que a inexistência de uma pedra porosa, na parte superior da amostra a ser eletro-drenada, não parece afetar substancialmente o ensaio para carregamentos estáticos. De qualquer forma, face à falta de informação mais conclusivas sobre o assunto, os valores de k_h e c_v para carregamentos estáticos na célula de eletro-drenagem não serão apresentados;
- Os valores de t_{50} para a eletro-drenagem variam entre 100 a 250 minutos, ou seja, cerca de 10 vezes o valor de t_{50} para carregamentos estáticos de 8 kg/cm^2 . Este fato, evidentemente, irá influenciar de sobremaneira os resultados de C_v e k_h na eletro-drenagem, como será visto adiante. Vale lembrar que a razão acima mencionada é exatamente a mesma encontrada por Wan⁴³(1970).

Para uma melhor visualização dos valores de p' equiv, são mostradas na Fig.31, as curvas índice de vazios versus pressão para os ensaios tipo 2. A parte pontilhada dos

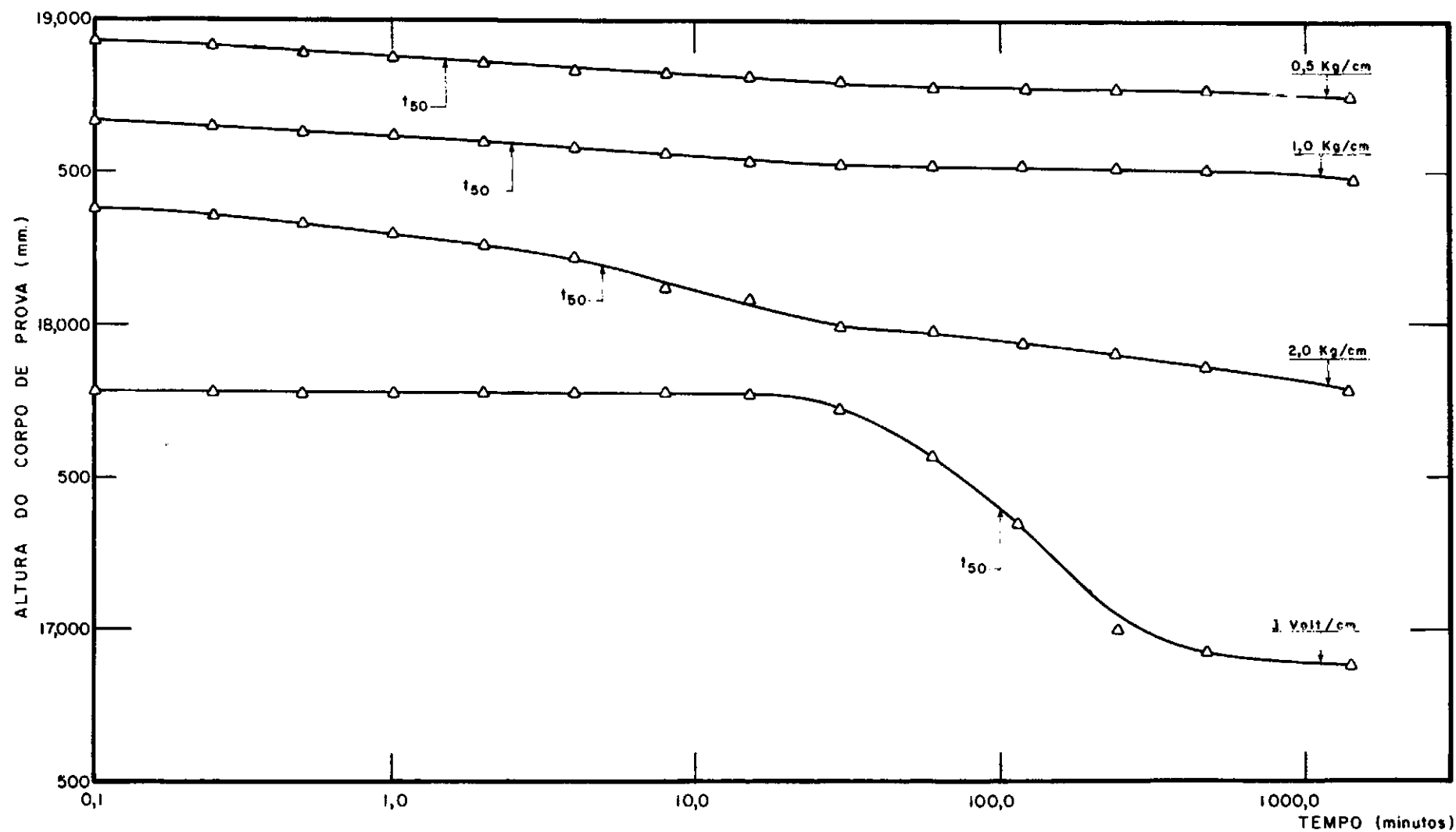


FIGURA 21 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2 Kg/cm² E A SEGUIR ELETRO-DRENADA (1^o ENSAIO)

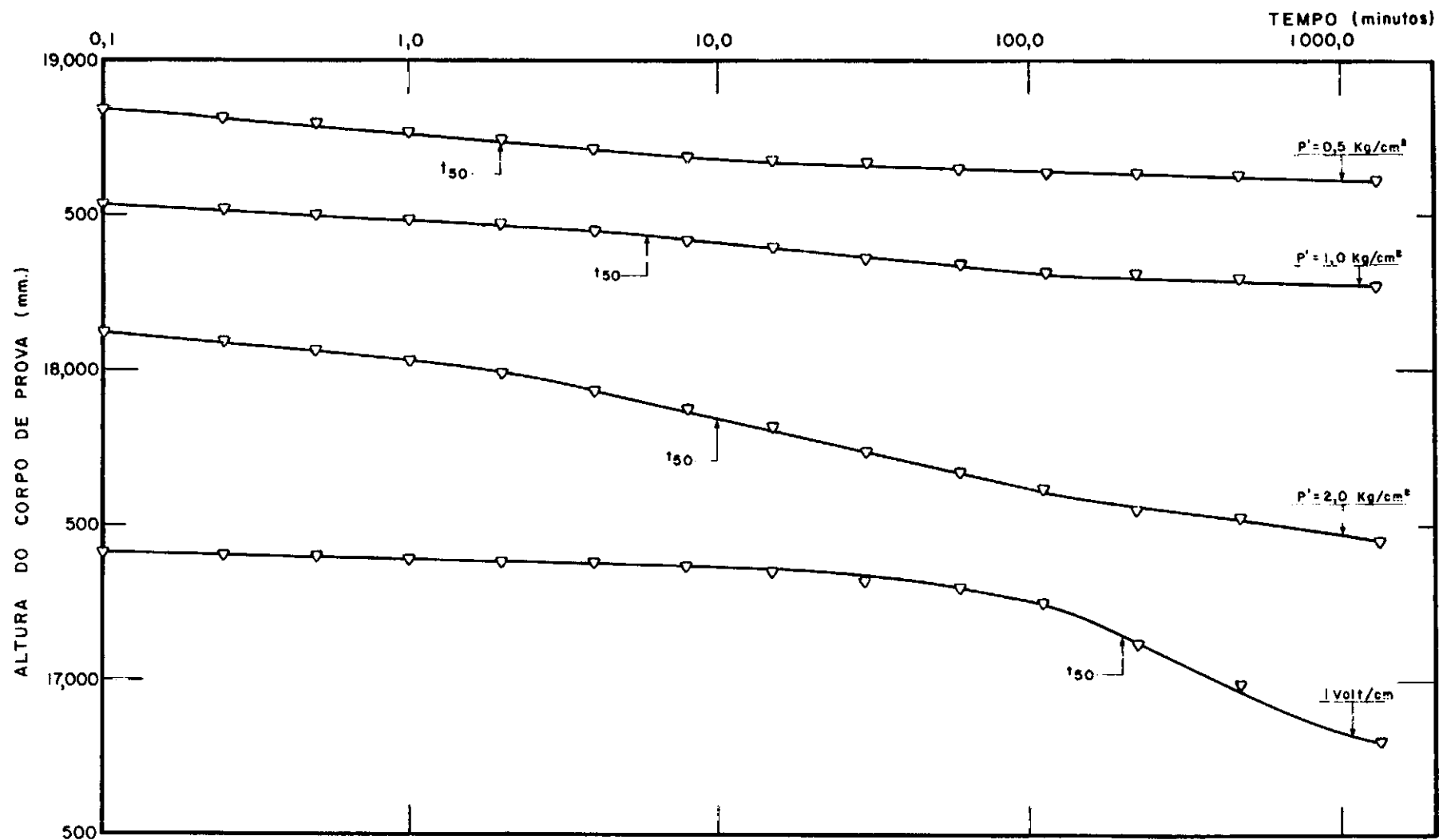


FIGURA 22 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2 Kg/cm^2
E A SEGUIR ELETRO-DRENADA (2º ENSAIO)

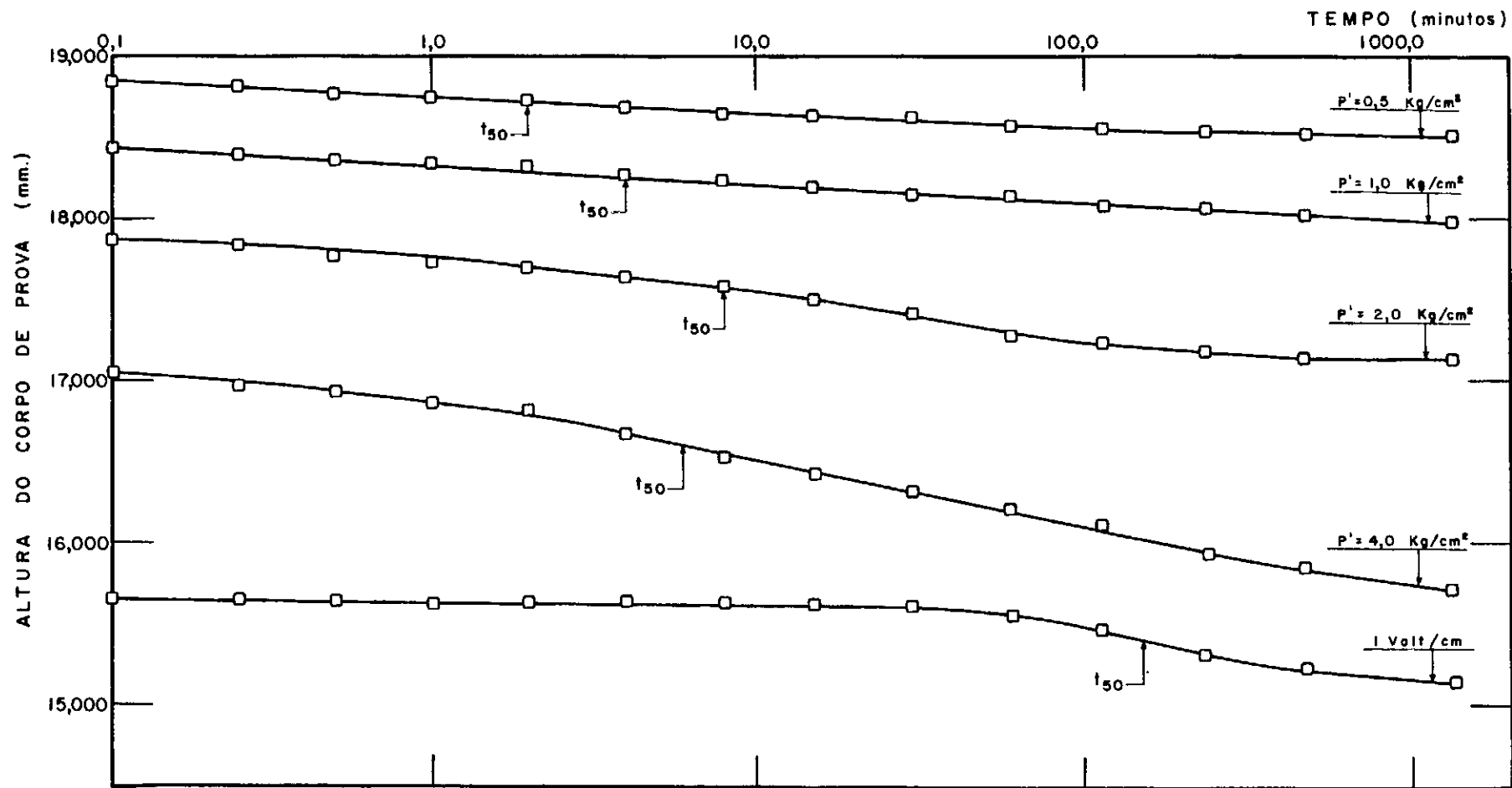


FIGURA 23 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A $4,0 \text{ Kg/cm}^2$ E A SEGUIR ELETRO - DRENADA

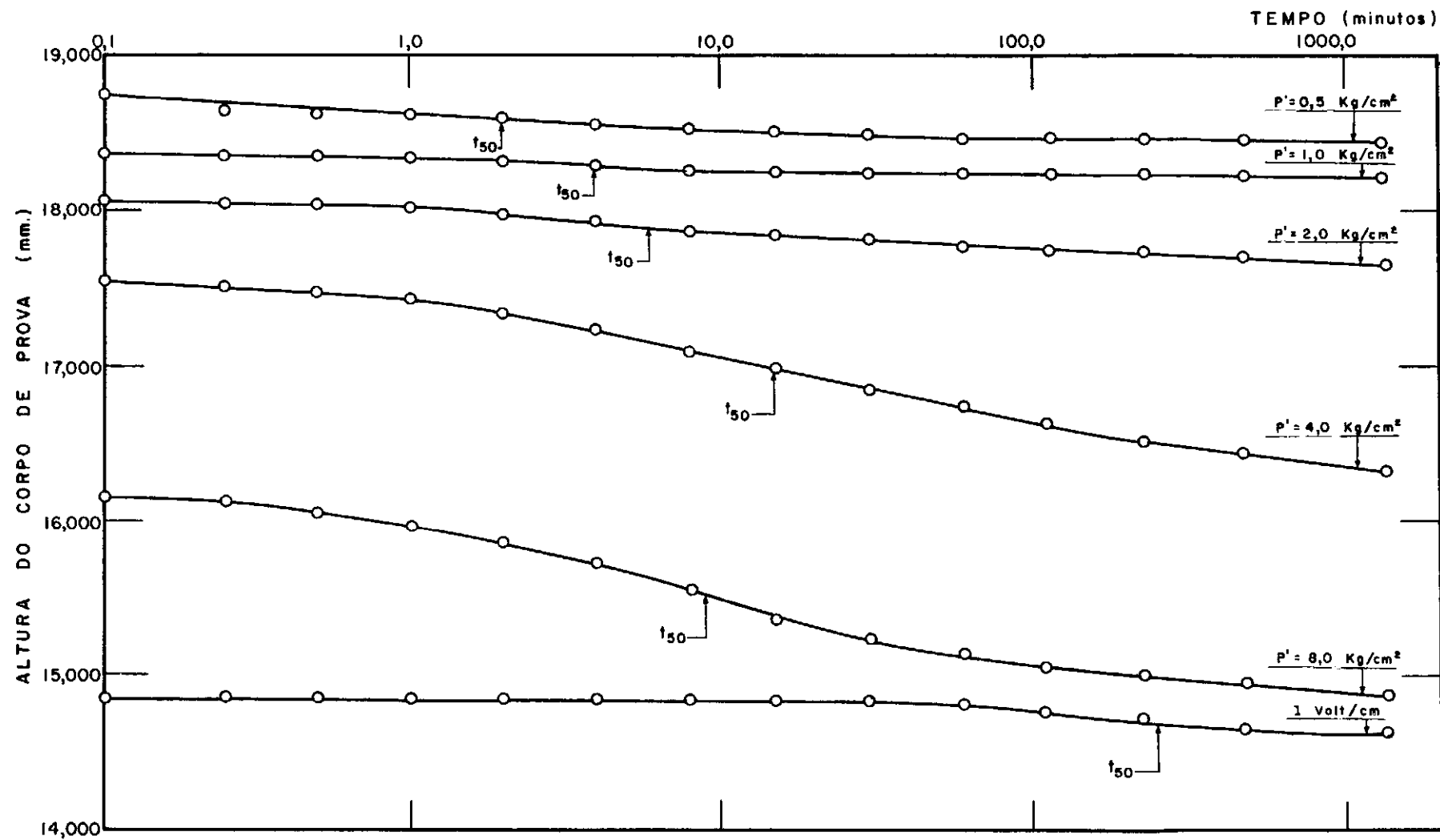


FIGURA 24 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm² E A SEGUIR ELETRO-DRENADA (1º ENSAIO)

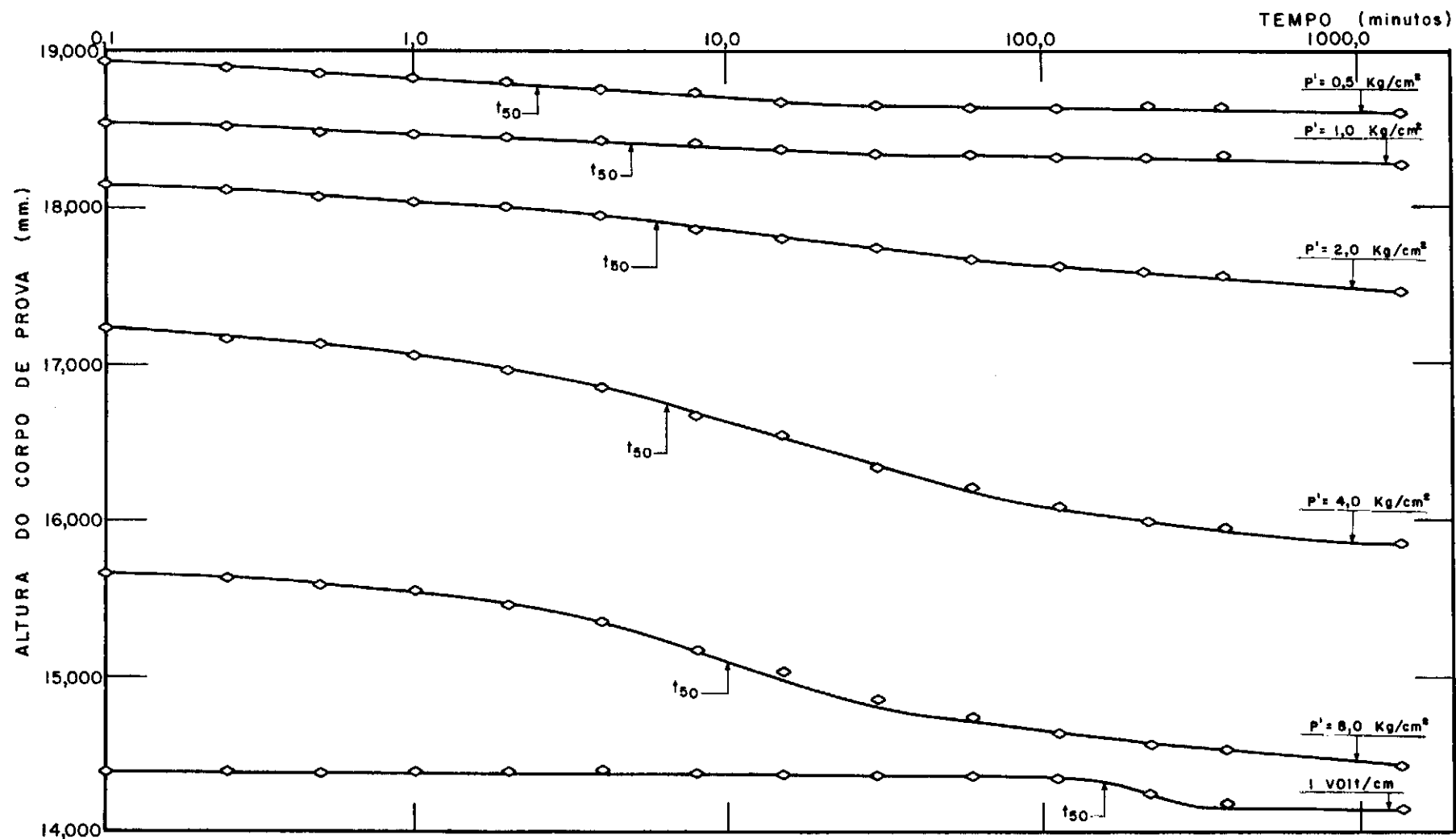


FIGURA 25 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm²
E A SEGUIR ELETRO-DRENADA (2º ENSAIO)

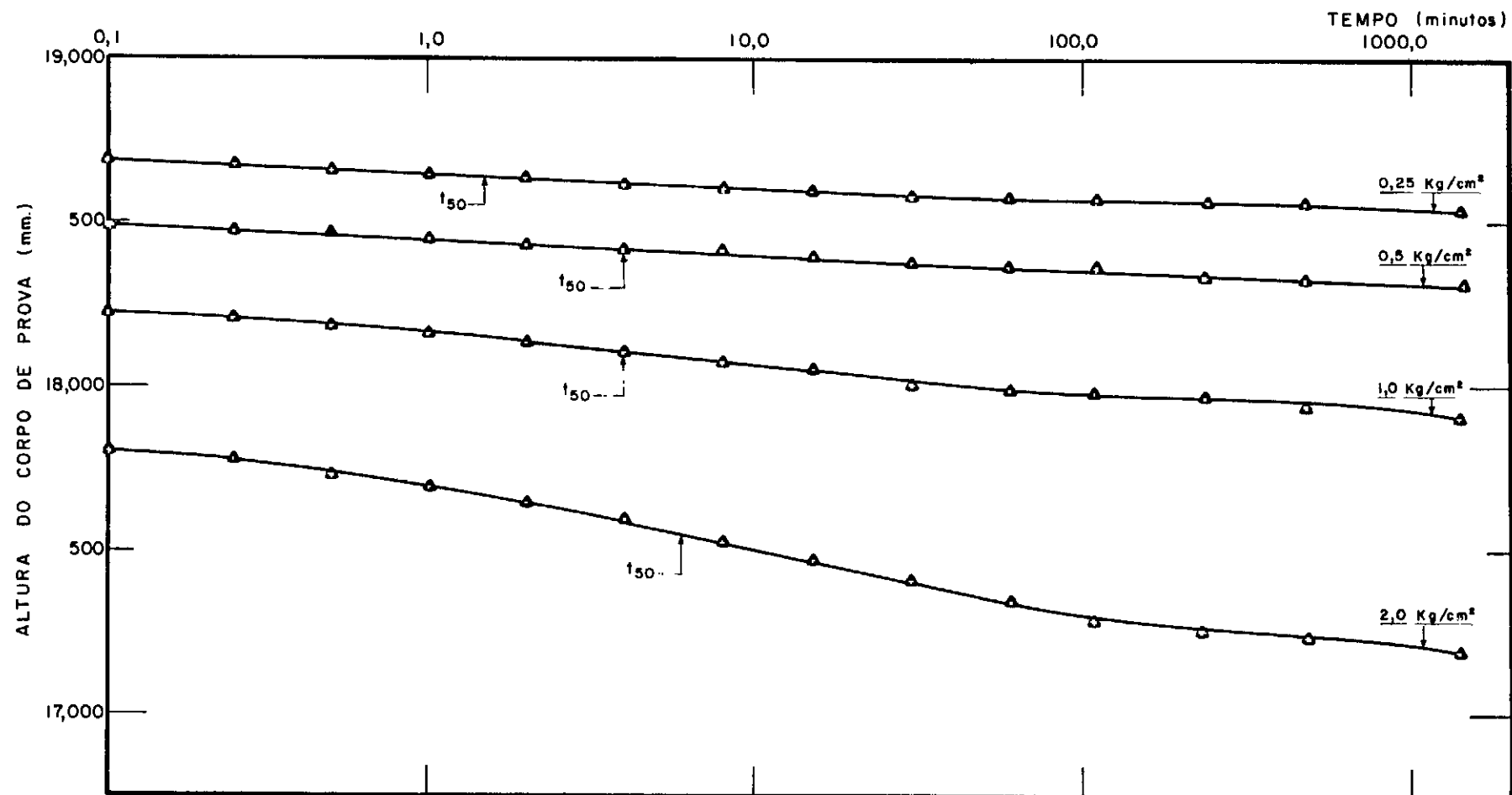


FIGURA 26- CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2 Kg/cm²
(1º ENSAIO)

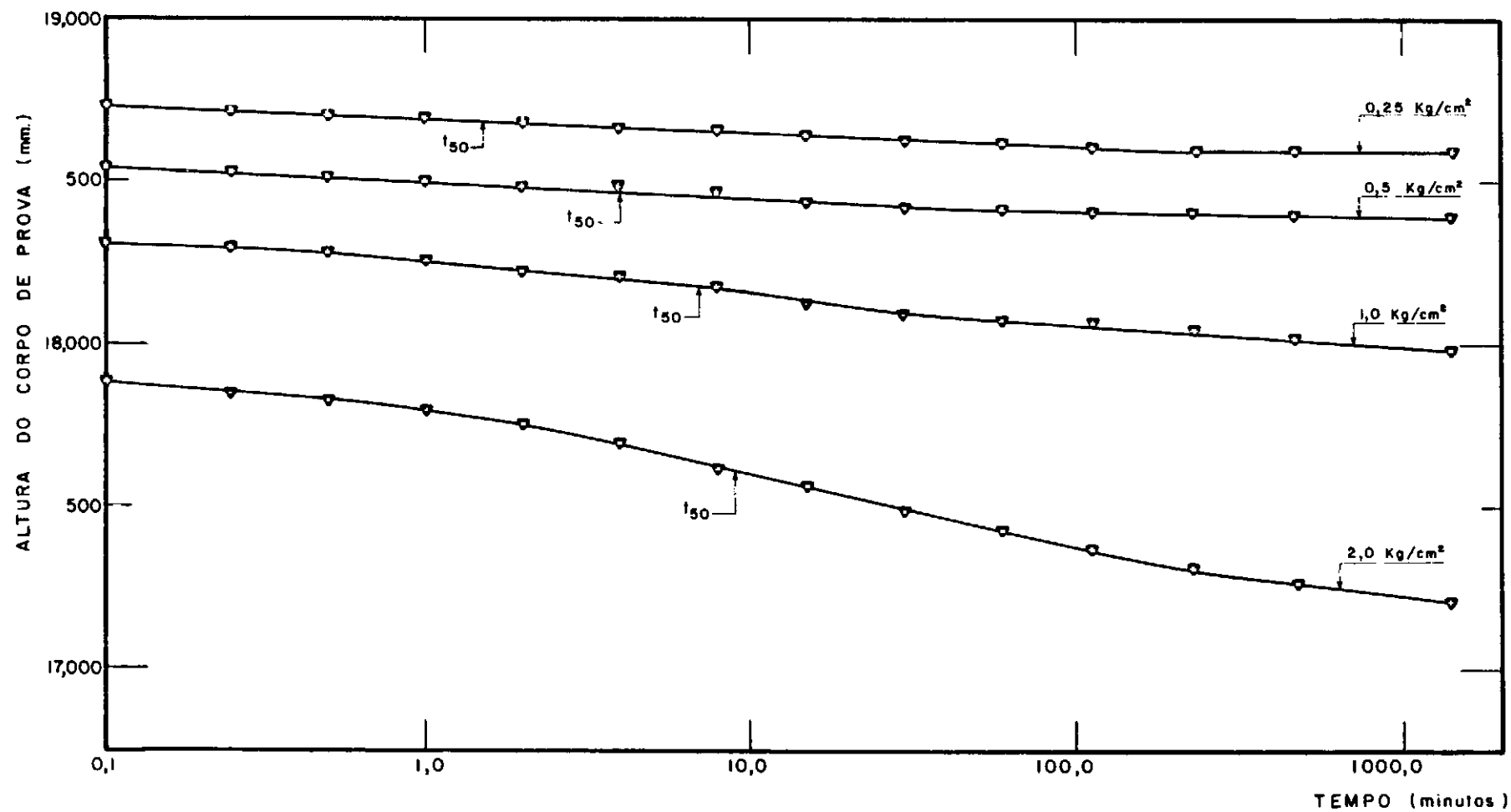


FIGURA 27 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 2 Kg/cm²
(2º ENSAIO)

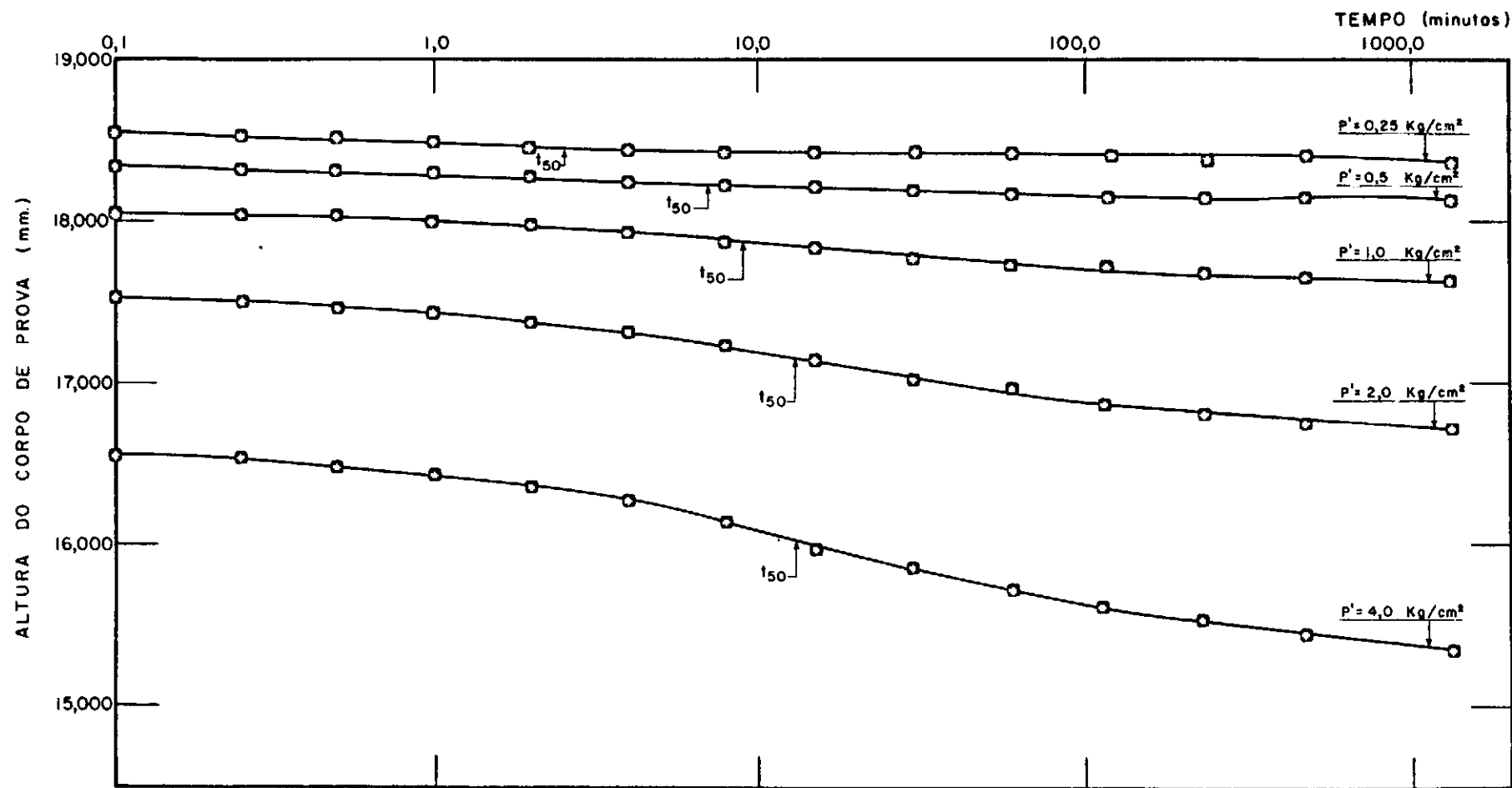


FIGURA 28 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4 Kg/cm^2

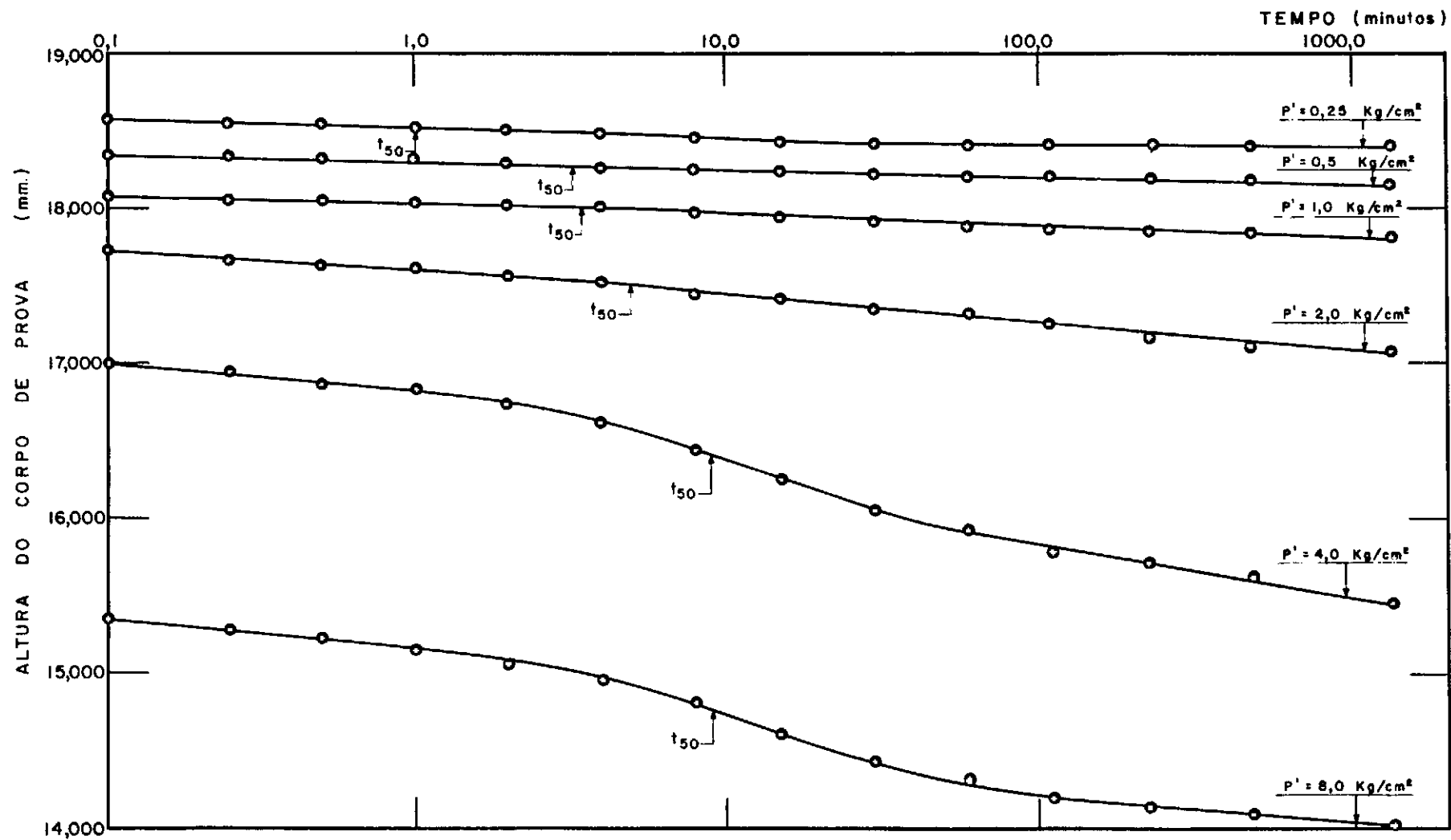


FIGURA 29 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8,0 Kg/cm²
(1º ENSAIO)

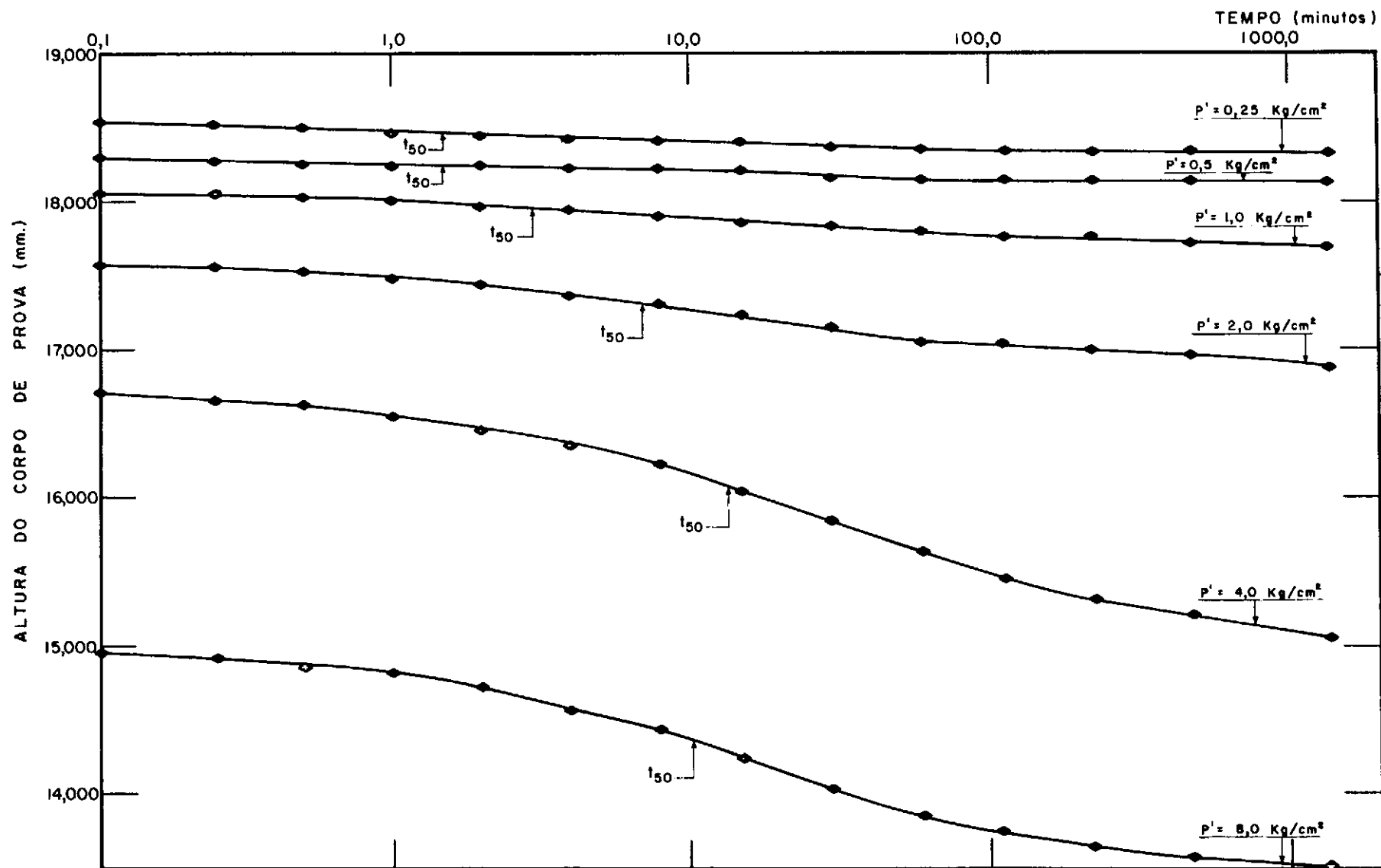


FIGURA 30 - CURVAS TEMPO VERSUS RECALQUE PARA AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 8 Kg/cm^2 (2º ENSAIO)

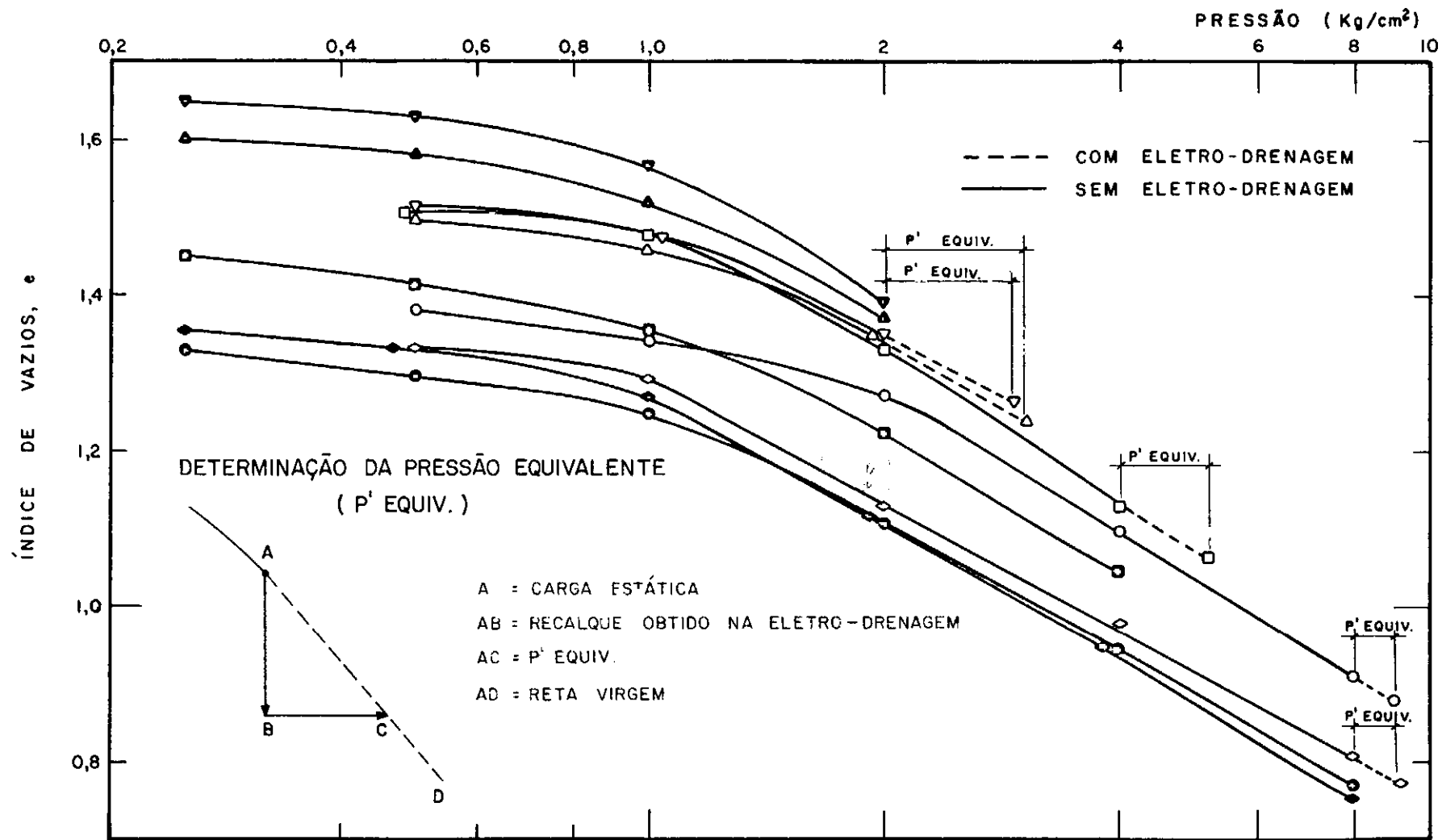


FIGURA 31 - PRESSÃO VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS PARA ADENSAMENTOS ELETRO-OSMÓTICO E CONVENCIONAL

gráficos representa a eletro-drenagem. Os valores de p' equiv. foram obtidos analiticamente para ter-se maior precisão (vide também simbologia da Tabela 7 para esta figura).

Os valores de C_v e k_h encontram-se plotados contra pressão e índice de vazios nas Figs. 32 e 33, respectivamente. Como já foi anteriormente dito, estão mostrados apenas os valores dos ensaios convencionais (em negrito) e os para eletro-drenagem, não se computando os valores para carregamentos estáticos em amostras a serem eletro-drenadas por indefinição do valor da altura da camada drenante.

Na Fig. 32 existem, para a mesma pressão, dois valores de C_v para eletro-drenagem. Isto se deve ao fato dos mesmos terem sido calculados para distribuições iniciais uniforme e triangular da poro-pressão ($T_v = 0,197$ e $T_v = 0,294$, respectivamente, para 50% de adensamento). A justificativa para isto é baseada no fato de que a distribuição final de poro-pressão negativa devido à eletro-osmose é triangular, o que equivaleria, de certa forma, à uma distribuição inicial de poro-pressão positiva triangular para carregamento estático.

A distribuição inicial uniforme de pressão neutra, só seria obtida caso houvesse uma reversão nos eletrodos a fim de uniformizar o adensamento. Contudo, face à pequena espessura das amostras, calculou-se também C_v (durante a eletro-drenagem) supondo-se que exista uma certa uniformidade no adensamento após a aplicação de gradiente elétrico, o que equivale a supor uma distribuição inicial (uniforme de pressão neutra positiva ou uma distribuição final uniforme de poro-pressão negativa). Obviamente, os maiores valores de C_v na eletro-drenagem são os correspondentes a $T_v = 0,286$ para 50% de adensamento.

Ainda na Fig. 32 (vide também simbologia da Tabela 6 para esta figura) nota-se que os valores de C_v , na eletro-drenagem, estão no limite inferior dos valores de C_v obtidos para carregamentos estáticos, o que foi observado por Wan⁴³ (1970), onde as diferenças são da ordem de 70%.

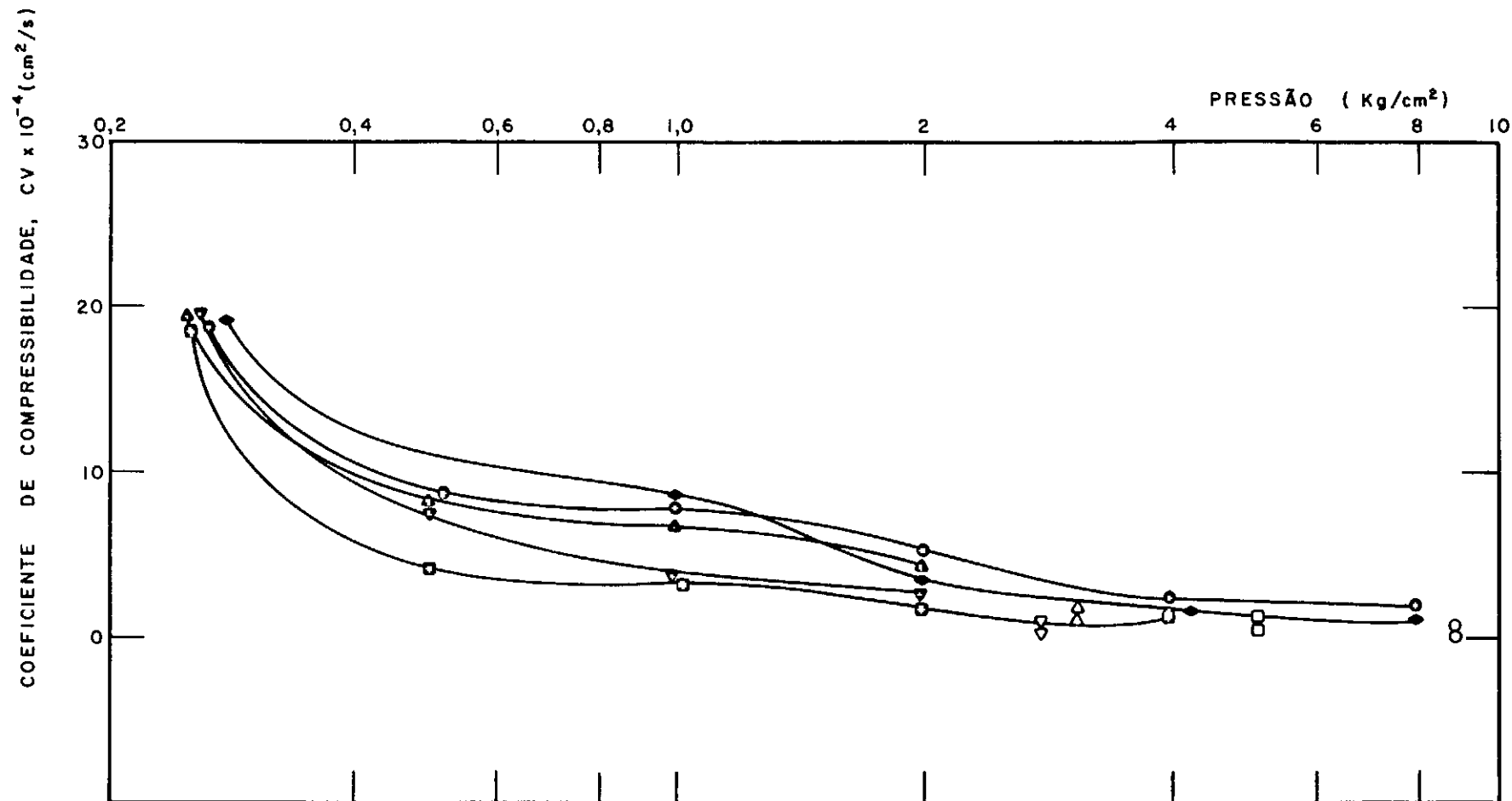


FIGURA 32 - PRESSÃO VERSUS COEFICIENTE DE COMPRESSIBILIDADE PARA ADENSAMENTO ELETRO-OSMÓTICO E CONVENCIONAL

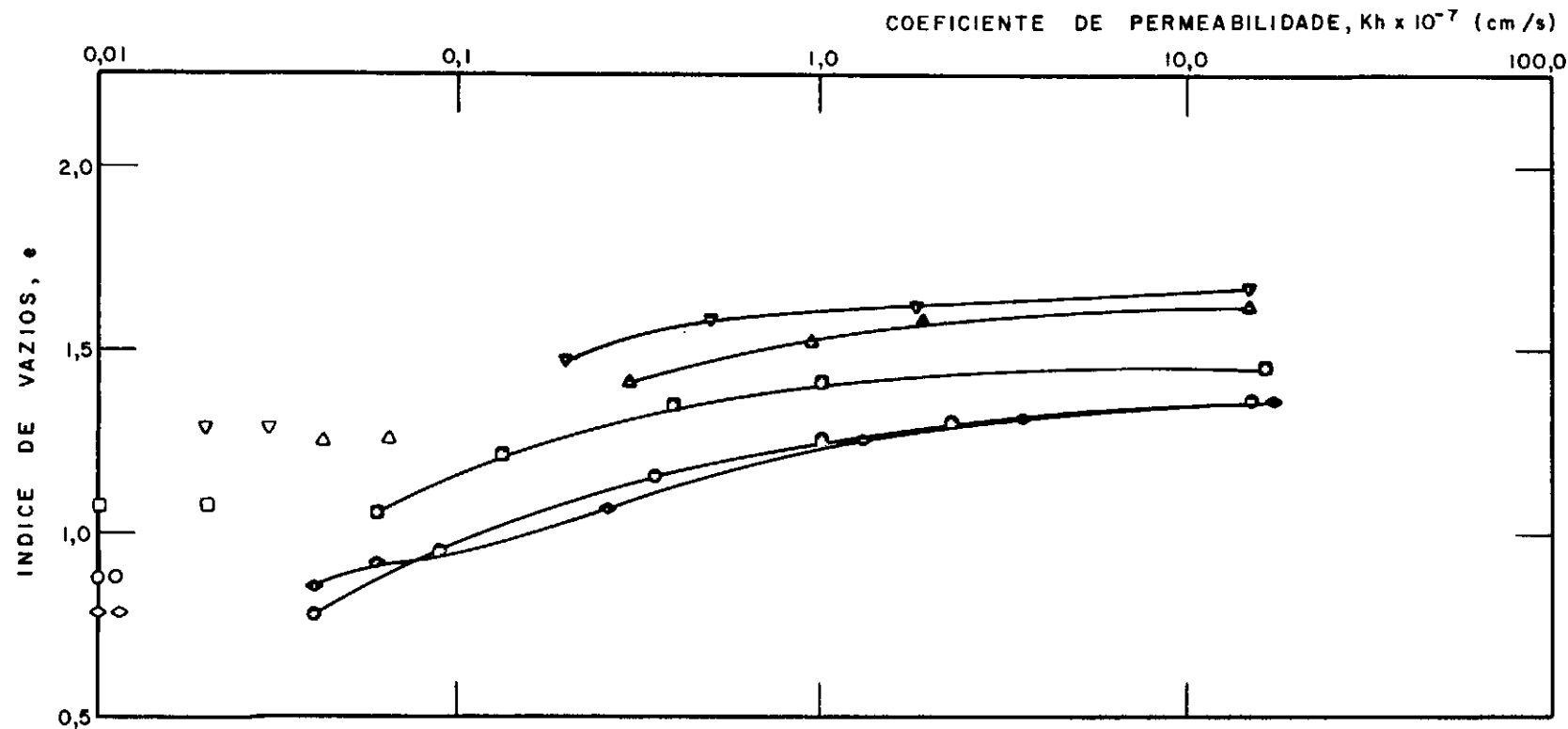


FIGURA 33 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE HIDRÁULICA VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS PARA ADENSAMENTO ELETRO-OSMÓTICO E CONVENCIONAL

Na Fig.33 (vide também simbologia da Tabela 6 para esta figura) existem também dois valores de K_h na eletro-drenagem para um mesmo índice de vazios, valendo o exposto para C_v nos parágrafos acima para explicação. Observa-se nesta figura que os valores de k_h para eletro - drenagem (não em negrito), em correspondência ao descrito para os valores de C_v , situam-se no limite inferior dos obtidos para carregamentos estáticos.

Assim sendo, em princípio, pode-se afirmar que valores obtidos de ensaios convencionais de adensamento não devem ser usados para prever o adensamento de solos finos por eletro-drenagem.

Finalmente, não se notou, durante a eletro-drenagem, fuga d'água pelo anodo, à semelhança das observações feitas para os ensaios tipo 1.

4.7.3 Ensaio Tipo 3

A Tabela 7 mostra o quadro geral de resultados dos ensaios tipo 3. Mais uma vez é notada semelhança com os resultados descritos nos itens anteriores.

Para os ensaios onde houve eletro-drenagem, a umidade no anodo é inferior à do catodo, enquanto no ensaio convencional o teor de umidade é constante ao longo de toda a amostra, decorridos 300 dias de ensaio. Em todos os ensaios as diferenças entre as umidades iniciais e finais (meio da amostra) são da ordem de 15%.

Semelhantemente aos demais ensaios feitos com esta argila orgânica mole, as pressões de pré-adensamento situam-se em torno da unidade, utilizando-se para tanto o método de Pacheco Silva.

Os valores de P'_{EQUIV} foram aproximadamente iguais $0,9 \text{ kg/cm}^2$ em ambos os ensaios onde houve eletro-drenagem, valendo aqui as mesmas observações feitas para os ensaios tipo 2.

Para as figuras que serão mostradas a seguir, vale a simbologia constante da Tabela 7.

As curvas tempo versus recalque, juntamente com o gráfico pressão aplicada versus tempo, são mostrados na Fig. 34. Não foi dada ênfase ao cálculo C_v , K_h , etc, já que

TABELA 7

QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS ENSAIOS TIPO 3

ENSAIO	GRAU DE SATURAÇÃO INICIAL S_i (%)	PESO ESPECÍFICO ÚMIDO INICIAL γ_h (t/m ³)	PESO ESPECÍFICO SECO INICIAL γ_s (t/m ³)	ÍNDICE DE VAZIOS INICIAL e_o	UMIDADE INICIAL w_i (%)	UMIDADE FINAL NO ANODO $w_f +$ (%)	UMIDADE FINAL NO MEIO DA AMOSTRA w_f (%)	UMIDADE FINAL NO CATODO $w_f -$ (%)	ÍNDICE DE COMPRESSÃO C_c (cm ² /Kg)	PRESSÃO DE PRÉ-ADENSAMENTO p'_{p0} (Kg/cm ²)	PRESSÃO EQUIVALENTE À APLICAÇÃO DE VOLTA- GEM. $p'_{equiv.}$ (Kg/cm ²)	SÍMBOLO DO ENSAIO NOS GRÁFICOS
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (1º ENSAIO)	97	1,67	1,09	1,45	53	35	38	37	0,69	1,1	0,9	□
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, ELETRO- DRENADA COM 1 Volt/cm (2º ENSAIO)	96	1,64	1,05	1,55	56	36	41	42	0,70	1,0	0,9	▽
AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE A 4,0 Kg/cm ² E, A SEGUIR, APLICADA $p'_{EQUIV.}$ (0,9 Kg/cm ²)	91	1,55	0,97	1,77	59	42	43	41	0,70	0,8	—	○

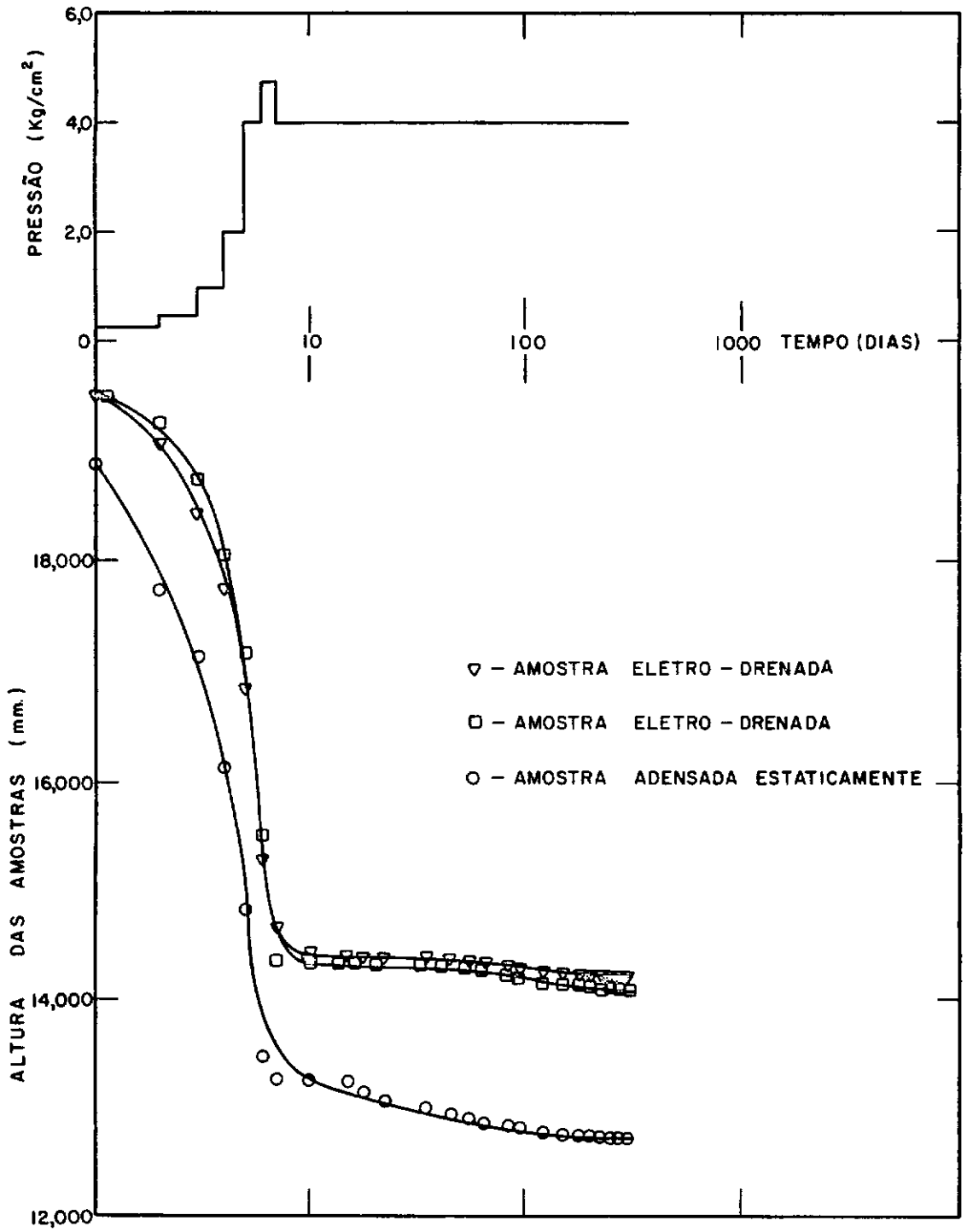


FIGURA 34-GRÁFICO TEMPO VERSUS RECALQUE EM FUNÇÃO DOS GRADIENTES APLICADOS

o interesse era exclusivamente voltado para compressão secundária, além do que a semelhança entre os ensaios ora descritos, e os já realizados tanto nesta pesquisa como por outros pesquisadores, é notória.

Ainda com relação à Fig. 34. nota-se que apesar das amostras terem altura iniciais diferentes, há uma diferença marcante no comportamento durante a compressão secundária, entre amostras eletro-drenadas e adensada estaticamente. Outro fato importante a ressaltar é perfeita coerência entre os resultados obtidos para as duas amostras eletro-drenadas, nas fases de adensamento estático, aplicação de voltagem e compressão secundária.

A Fig. 35 mostra mais detalhadamente o comportamento das amostras durante a compressão secundária, em termos de deformação específica versus tempo. Nota-se que as amostras eletro-drenadas demoram cerca de 30 dias para entrar em compressão secundária, enquanto que a amostra convencionalmente adensada começa a comprimir-se quase que imediatamente. Vê-se ainda que, ao cabo de 300 dias, as amostras eletro-drenadas deformaram-se cerca de 2%, enquanto a adensada estaticamente atingiu a 4,25%.

O valor de $C\alpha$ (coeficiente angular da reta de compressão secundária) não pode ser determinado com precisão, já que a forma como se comportaram as amostras não é necessariamente a de uma reta. Contudo, para a amostra adensada estaticamente, existe um intervalo entre 5 e 150 dias que pode ser assimilado a uma reta, fornecendo o valor de 0,025 para $C\alpha$. Tal valor coincide com o proposto por C.C.Ladd, citado em Lambe e Whitman²⁴ (1972), que é de 0,03 (ou mais) para solos orgânicos.

A interpretação das diferenças de comportamento durante a compressão secundária entre as diversas amostras é, a luz dos conhecimentos atuais, ainda complexa.

Devido a esta complexibilidade, tentou-se analisar os fenômenos ocorridos através de fotografias obtidas com o auxílio de microscópio eletrônico de varredura. Contudo, face à existência de problemas com a aparelhagem, não foi

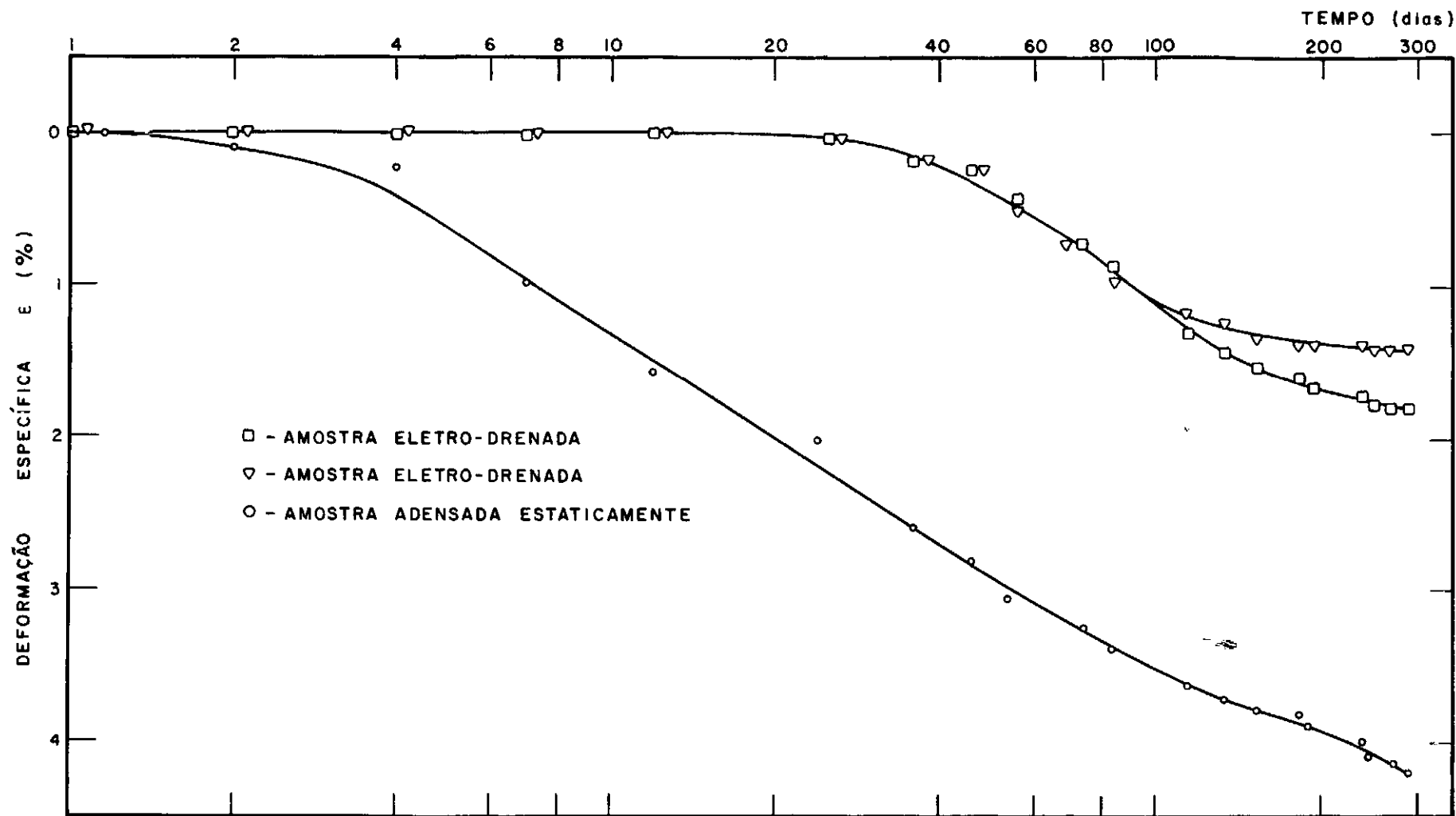


FIGURA 35 - DEFORMAÇÃO ESPECÍFICA VERSUS TEMPO A PARTIR DA INTERRUÇÃO DE VOLTAGEM E RETIRADA DE P' EQUIV.

possível conseguir-se uma ampliação significativa das fotografias, ficando estas limitadas a um aumento máximo de cerca de 1000 vezes.

Assim, apenas com o caráter de ilustração, são mostrados nas Fotos 14 a 21 alguns aspectos da mineralogia da argila orgânica ensaiada nesta pesquisa, indicando-se escala e procedência, isto é, se obtidas de amostras eletro-drenadas ou não.

Muito embora fosse notada, à vista desarmada (e de certa forma nas fotografias), uma deposição de óxidos provenientes da composição dos eletrodos nas amostras eletro-drenadas, é difícil avaliar, à falta de outras evidências, qual o efeito de tal deposição no comportamento das amostras submetidas à uma diferença de potencial elétrico.

Finalmente, na Fig. 36, são apresentadas as curvas pressão versus índice de vazios dos ensaios tipo 3, onde pode-se observar a semelhança entre as três amostras na fase de compressão primária, fato este que não ocorreu na compressão secundária, conforme o acima exposto.

Concluindo, é interessante mencionar que alguns dos problemas que poderiam, de alguma forma, mascarar os resultados ora apresentados, foram convenientemente contornados levando-se as prensas de adensamento para a parte inferior do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, sob a placa de reação lá existente. Com isto, conseguiu-se:

- Eliminar problemas de vibração devido ao trânsito de veículos, transporte de equipamentos e até mesmo influência de pessoas desavisadas;
- Conduzir a um mínimo possível as variações da temperatura ambiente e da água da célula, já que no Laboratório de Solos tais variações eram de grande monta. Desta forma, conseguiu-se que as temperaturas variassem apenas de 22° a 27° (ambiental) e de 21° a 25° (água da célula de adensamento).

Vale ainda lembrar que, à semelhança dos demais ensaios, não se notou fuga d'água pelo "Top-Cap" quando da eletrodrenagem, e que atualmente o controle da temperatura seria possível na sala de "Creep" das novas instalações do Laboratório de Solos da COPPE/UFRJ.

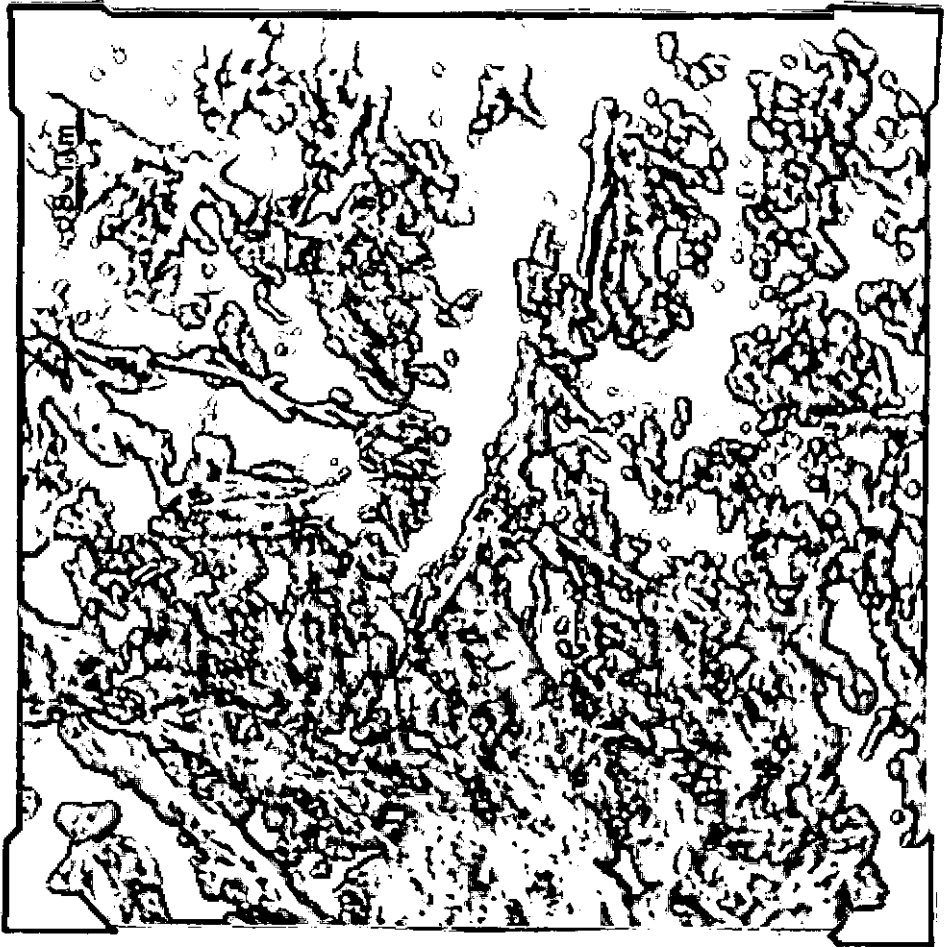


FOTO 14 REGIÃO DO ANODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

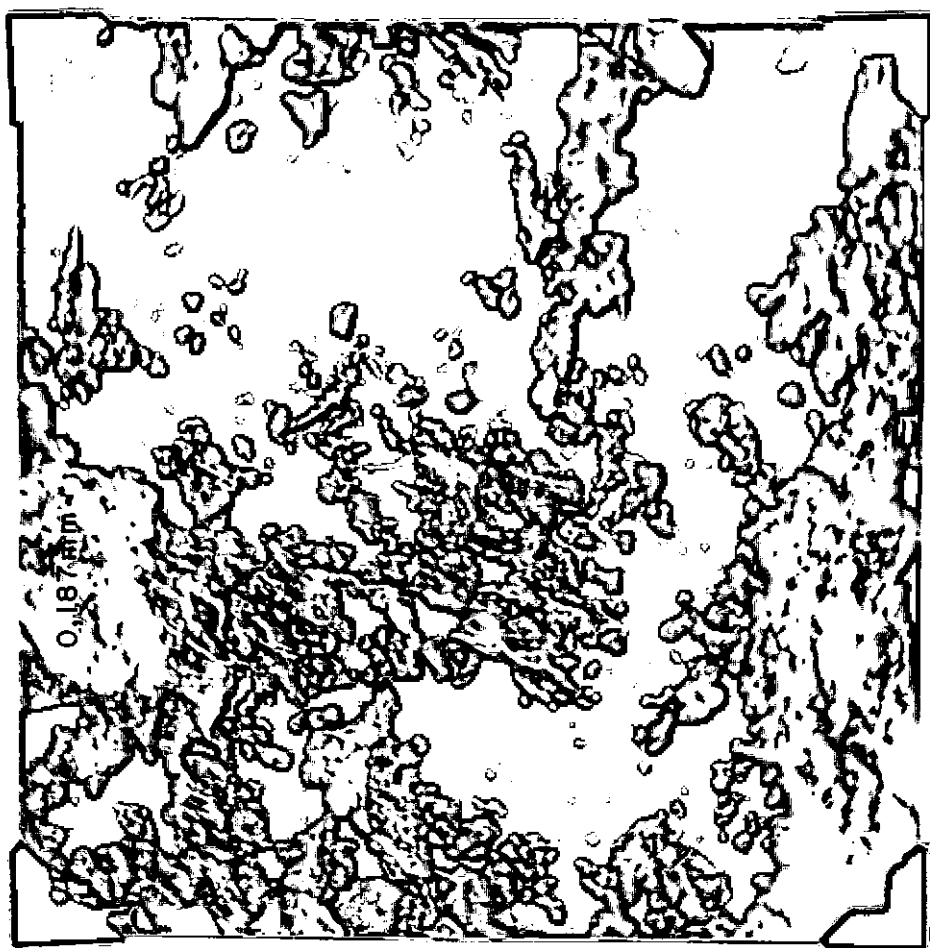


FOTO 15 REGIÃO DO ANODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

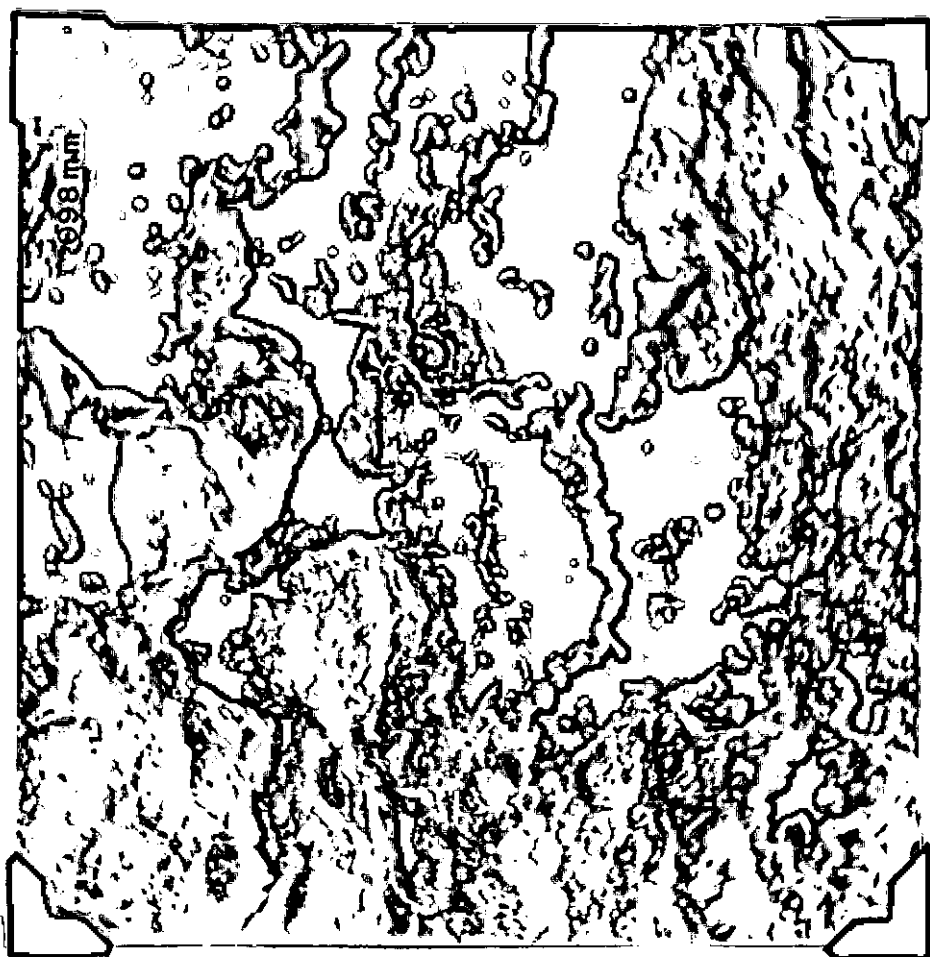


FOTO 16 REGIÃO ENTRE ANODO E CATODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

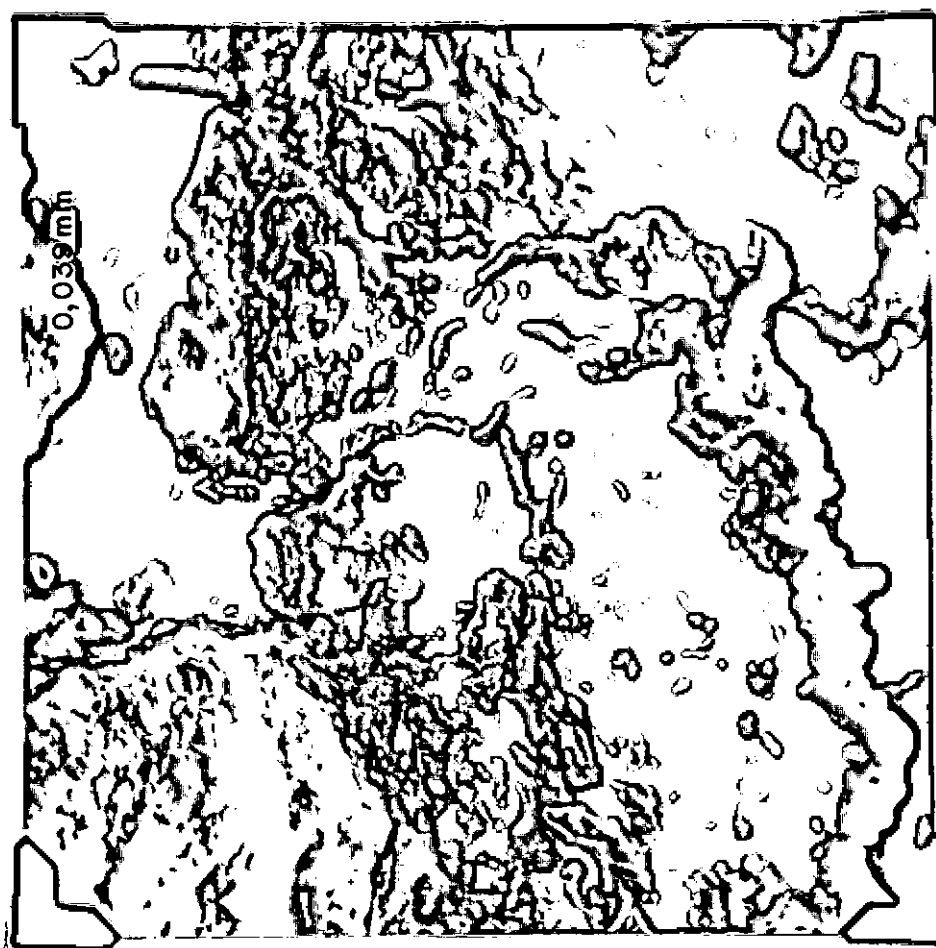


FOTO 17 REGIÃO ENTRE CATODO E ANODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

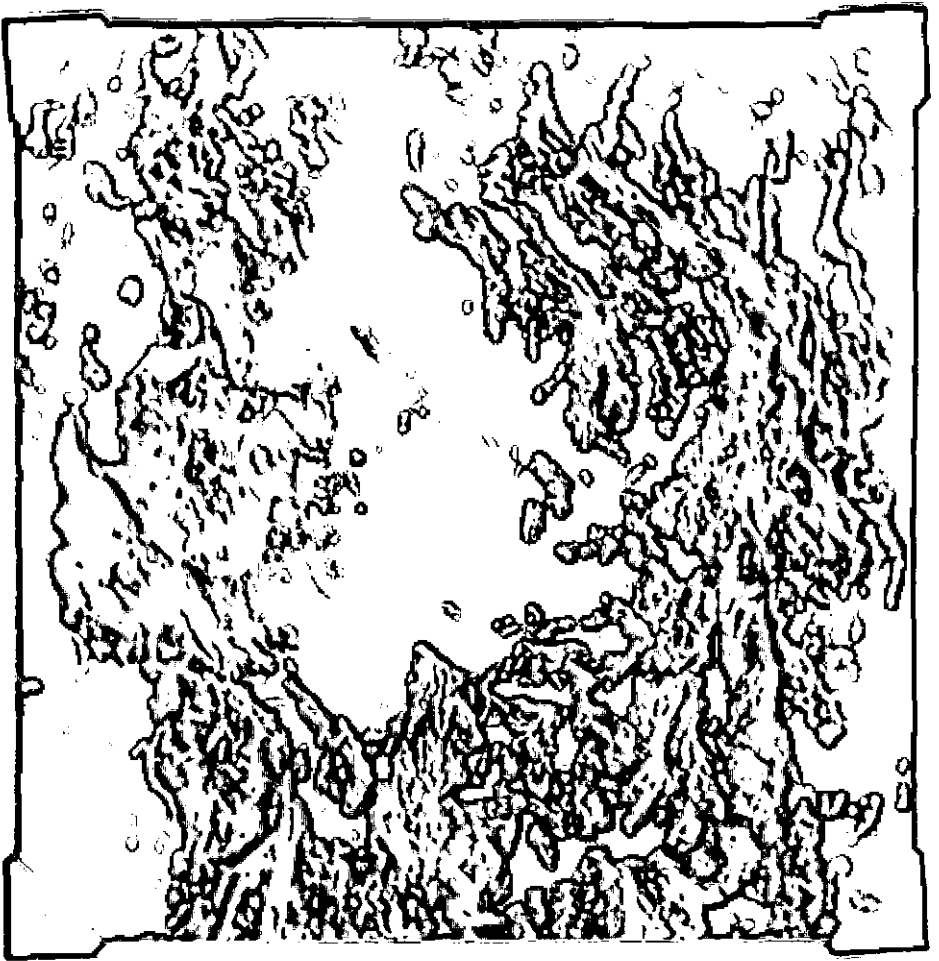


FOTO 18 REGIÃO DO CATODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

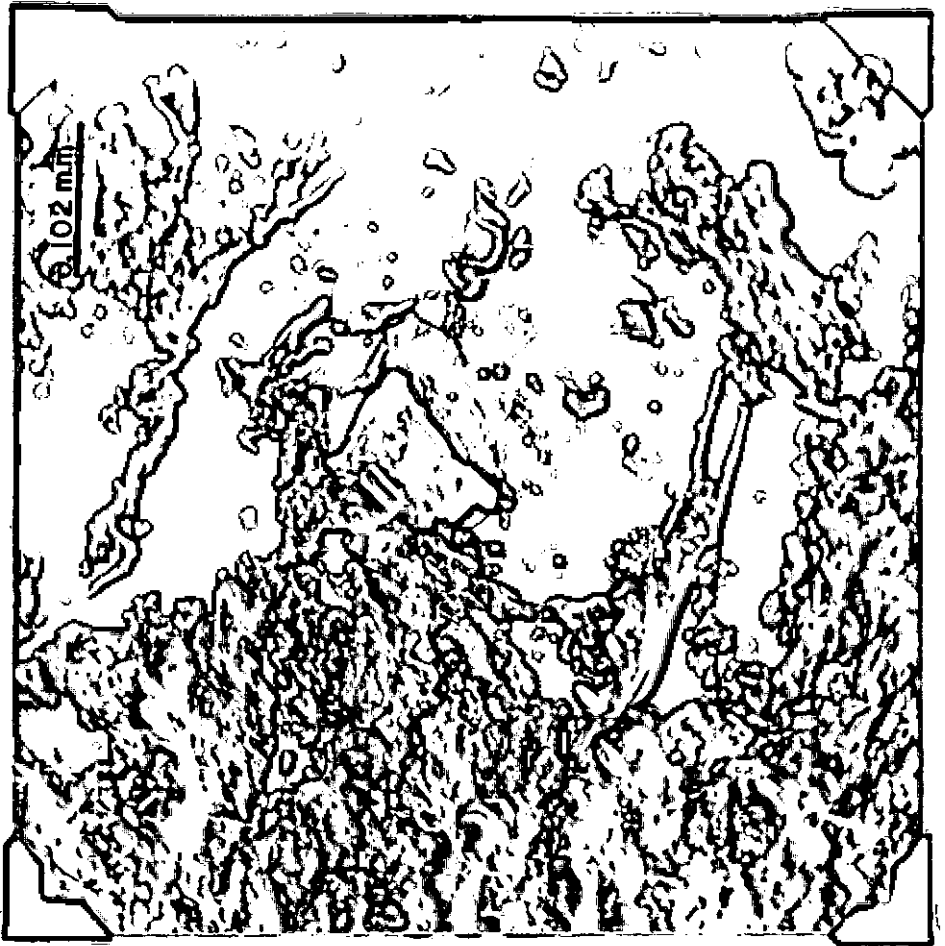


FOTO 19 REGIÃO DO CATODO APÓS ELETRO-DRENAGEM

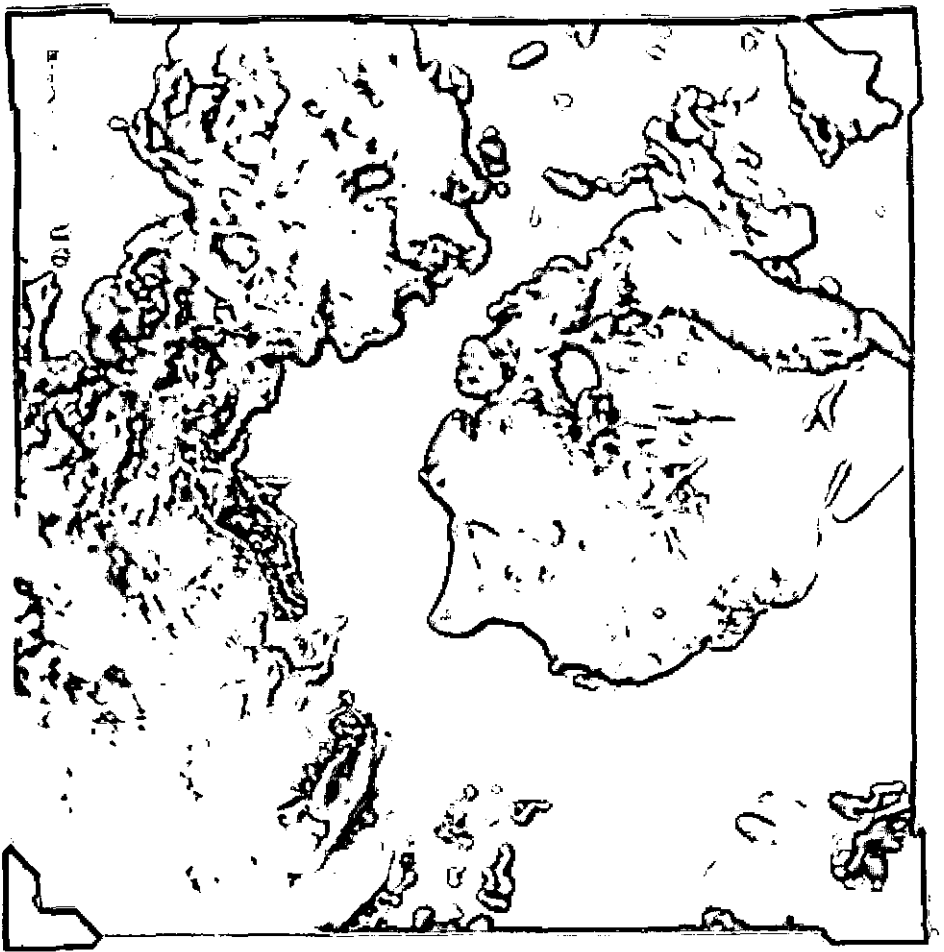


FOTO 2.0 AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE

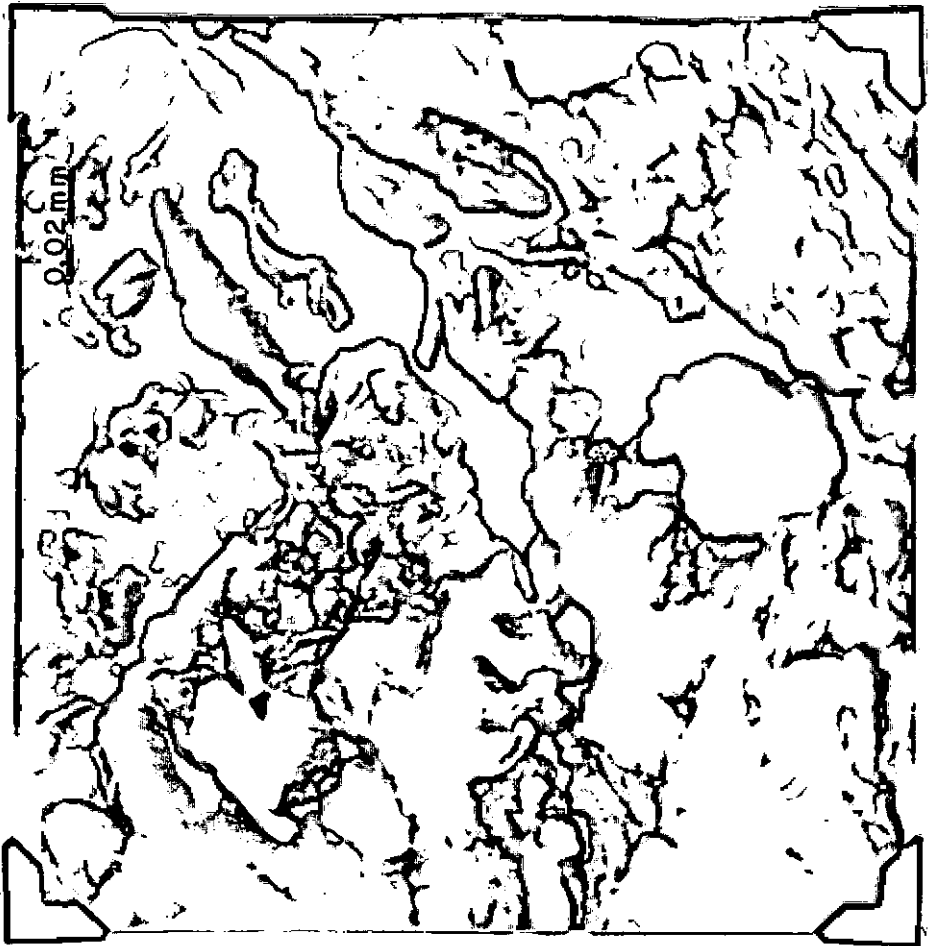


FOTO 21 AMOSTRA ADENSADA ESTATICAMENTE

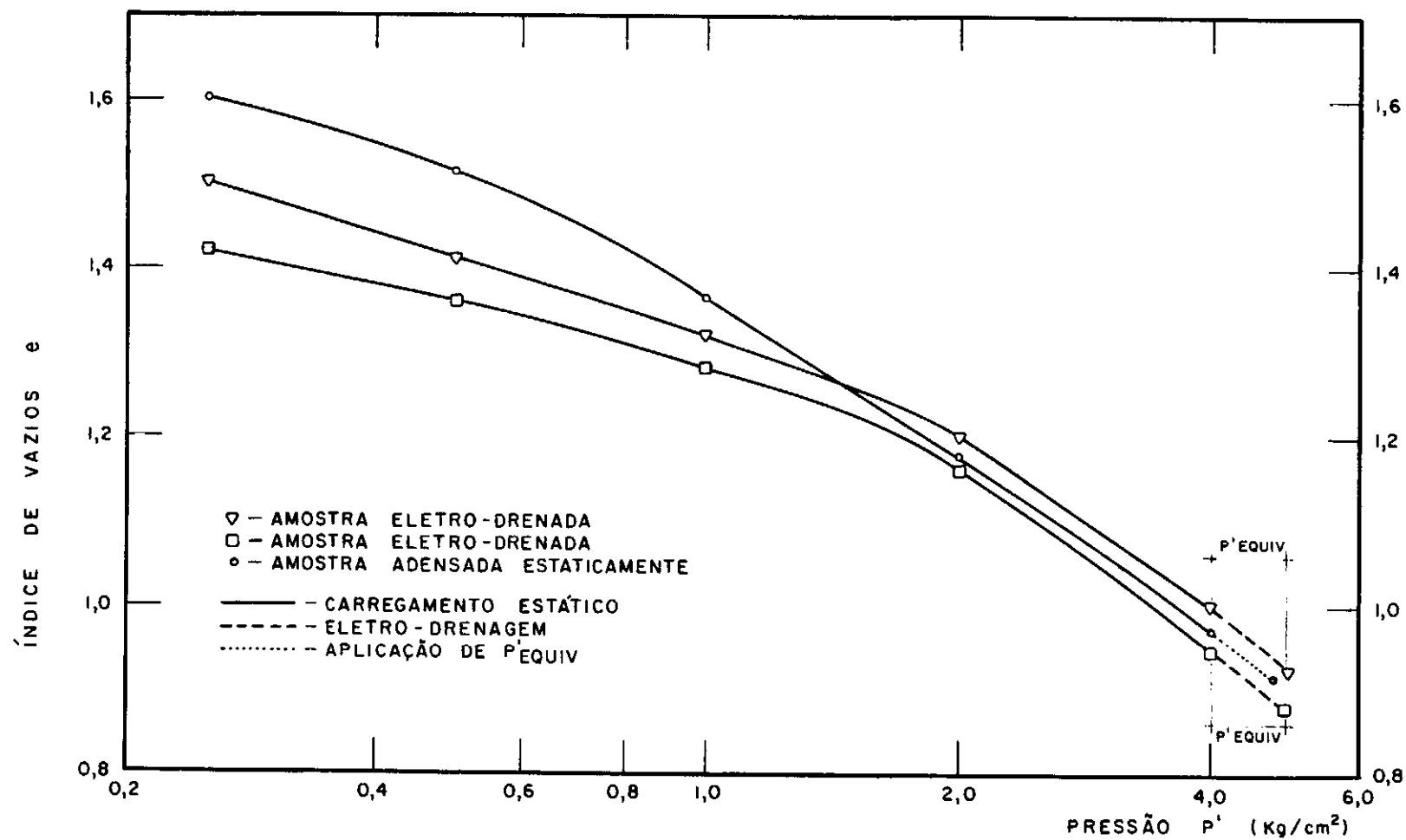


FIGURA 36 - PRESSÃO VERSUS ÍNDICE DE VAZIOS NA COMPRESSÃO PRIMÁRIA

4.7.4 Ensaio Tipo 4

As amostras, devido à industrialização da bentonita, eram deformadas. Para que esta bentonita sódica fosse moldada no anel de arílico com grau de saturação elevado, requisito obrigatório pela teoria de Terzaghi, elevados teores de umidade eram necessários. Além disso a "trabalhabilidade" deste material era difícil, exigindo ainda mais água destilada. Ora, com tal consistência, a simples aplicação de um carregamento estático de $1,0 \text{ kg/cm}^2$ produziu a rotura do material conforme mostrado nas fotos 22, 23 e 24. Por este motivo os ensaios neste material foram cancelados.

4.8 Conclusões

As principais conclusões relativas ao Capítulo IV são as seguintes:

- A aparelhagem desenvolvida para a eletro-drenagem mostrou-se eficaz, sem que houvessem quaisquer problemas além das limitações previamente esperadas. Além disso, tal aparelhagem é de simples construção e manejo, podendo ser incorporada a prensas de adensamento convencionais;
- A argila orgânica, coletada do subsolo da Av. Presidente Vargas, apresentou parâmetros perfeitamente coerentes com os encontrados por outros pesquisadores, como também homogeneidade nos diversos ensaios realizados nesta pesquisa;
- Quanto maior o gradiente elétrico, maiores serão os resultados, até que se atinja um valor ótimo, a partir do qual o processo de eletro-drenagem perderá sua eficiência. Nos ensaios tipo 1, face à não medição da resistência do solo com o tempo, notou-se a perda de eficiência principalmente pela cavitação da água intersticial, e pelos valores finais da deformação específica;
- Os valores de $P'_{EQUIV.}$ situam-se em torno de 1 kg/cm^2 , tanto para os ensaios tipo 2 como para os do tipo 3. Estes valores encontram-se plenamente concordantes com os da bibliografia consultada e com o valor obtido a partir de desenvolvimento teórico, o que valida a metodologia e a aparelhagem aqui desenvolvidas.

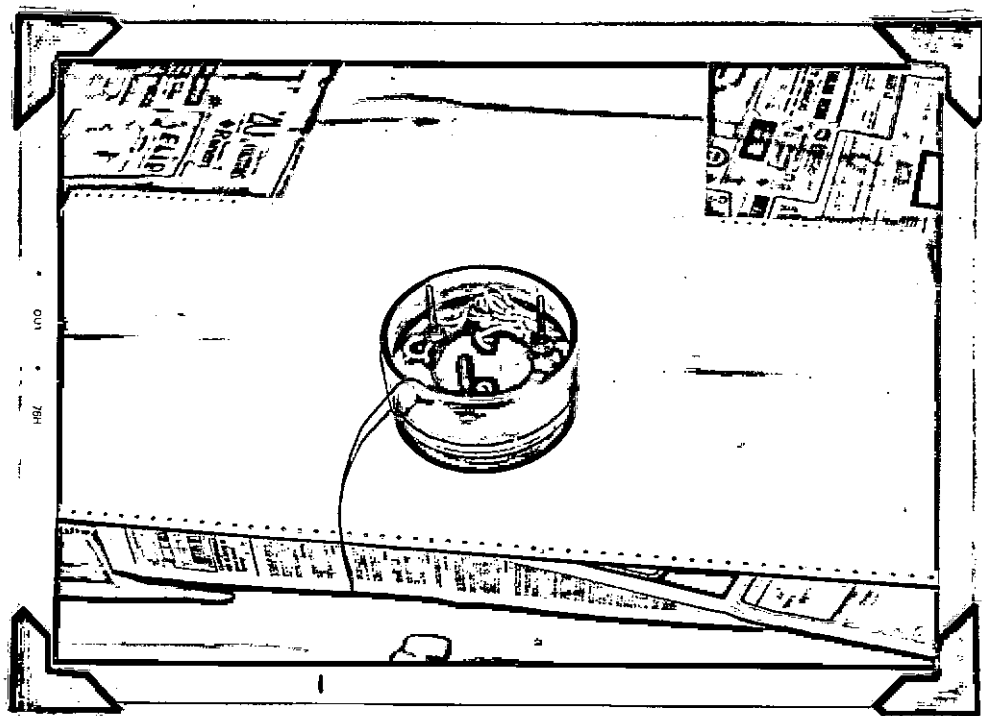


FOTO 22 FLUIMENTO DA BENTONITA

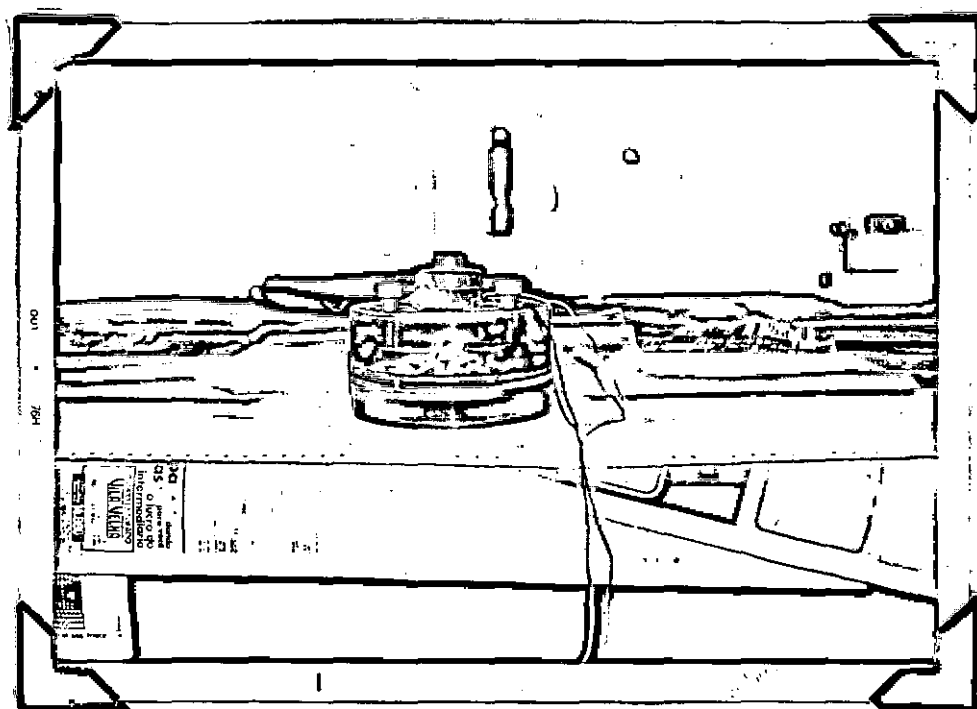


FOTO 23 FLUIMENTO DA BENTONITA

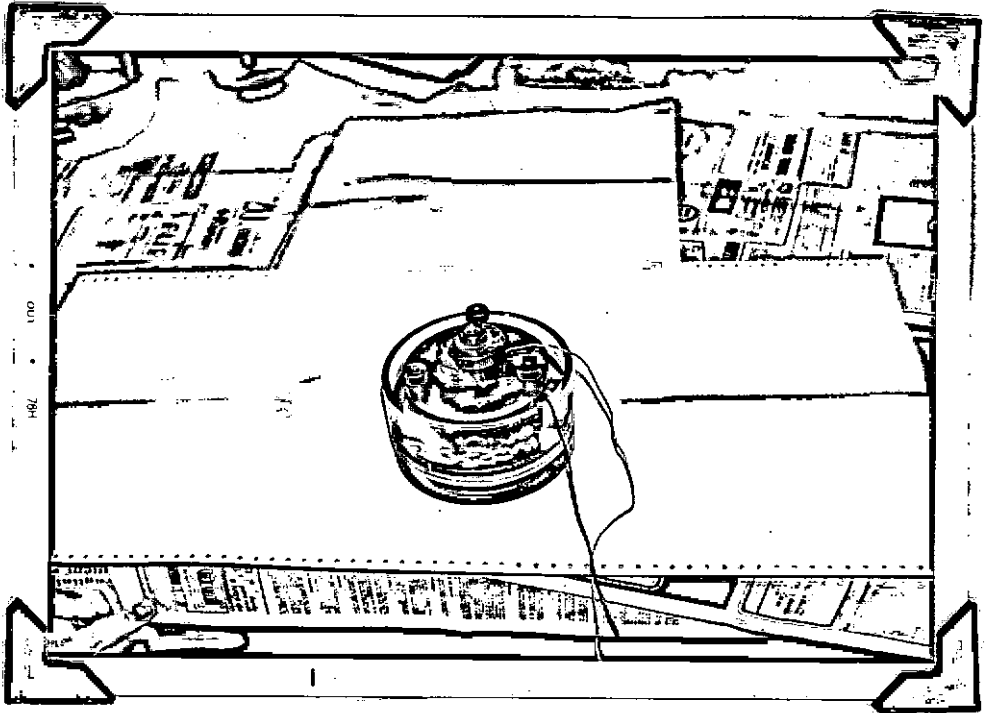


FOTO 24 FLUIMENTO DE BENTONITA

- Os valores de t_{50} durante a eletro-drenagem variam entre 100 e 250 minutos. Para ensaios de adensamento convencional, t_{50} oscila entre 1 e 15 minutos (para o nível de até 8kg/cm^2). Ou seja, os valores de t_{50} durante a eletro-drenagem são bastante superiores aos obtidos para carregamentos estáticos. A explicação para este fenômeno ainda foi possível, à luz dos conhecimentos atuais sobre o complexo efeito da eletro-osmose em solos finos;
- Os valores de C_v e K_h durante a eletro-drenagem são inferiores aos obtidos em ensaios convencionais de adensamento, face às diferenças de t_{50} acima mencionadas. Desta maneira não se deve estrapolar os resultados de ensaios de adensamento convencionais para a eletro-drenagem;
- Existem sensíveis diferenças entre o comportamento de amostras eletro-drenadas e adensadas estaticamente na compressão secundária. As primeiras sofrem um efeito de retardamento, enquanto que para ensaio convencional a entrada na compressão secundária é quase que imediata.
- O valor do coeficiente angular da reta de compressão secundária (C_α), em ensaio convencional de adensamento, é da ordem de 0,025 para esta argila orgânica da cidade do Rio de Janeiro, durante cerca de 150 dias de ensaios. Após este período, existe uma tendência para que C_α diminua. Nos ensaios onde houve previamente eletro-drenagem, C_α é praticamente zero até 50 dias, apresentando a seguir um certo aumento até os 150 dias, e depois mostra também tendência a um certo abrandamento.

Como principais sugestões para futuras pesquisas no campo da eletro-drenagem, é sugerido que:

- Desenvolva-se aparelhagem que permita; a aplicação simultânea de carregamentos estáticos e diferenças de potencial, medição de resistividades e medição do PH, visando esclarecer melhor este fenômeno eletro-cinético;
- Pesquisem-se quais os principais fatores que acarretam a diminuição de C_v e K_h durante a eletro-drenagem, procurando-se então a melhor forma de contorná-los.

- Ampliem-se as pesquisas sobre o efeito da eletro-drenagem na compressão secundária, variando-se as razões de carregamento estático e mesmo do nível de pressões estáticas sob o qual se dará tal compressão;
- Façam-se ensaios físico-químicos mais apurados, paralelamente aos ensaios de eletro-drenagem, visando conhecer mais de perto a mecânica do processo eletro - osmótico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - Bally, R. & Antonescu, I. (1961). "Aplicação de l' Electro-Osmose a l' Etude des Sols et a leur Consolidation", Proc. 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 4-11.
- 2 - Bjerrum, L., Moum, J. & Eide, O. (1967). "Application of Electro-Osmosis to a Foundation Problem in a Norwegian Clay", Geotechnique, Vol. 17, September, pp. 214-235.
- 3 - Bozozuk, M. & Labrecque, A. (1969). "Drownage Measurements on 270-Ft Composite Piles", Performance of Deep Foundations, ASTM, STP 444, pp. 15-40.
- 4 - Cambefort, H. & Caron, C. (1961). "Electro-Osmose et Consolidation Electro-Chimique des Argiles", Geotechnique, Vol. 11, pp. 203-233.
- 5 - Caron, C. (1968). "Applications et Essais dans le Domaine de l' Electro-Osmose des Terrains Sableux et Argileux", Bulletin Technique de La Suisse Romande, no. 1, Janvier.
- 6 - Caron, C. (1971). "Consolidation des Terrains Argileux par Electro-Osmose", Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics, Série Sols et Fondations, no. 82.
- 7 - Casagrande, L. (1949). "Electro-Osmosis in Soils", Geotechnique, Vol. I, pp. 159-177.
- 8 - Casagrande, L. (1957). "Review of Past and Current Work on Electro-Osmotic Stabilization of Soils". Harvard Soil Mechanics Series, no. 45.
- 9 - Casagrande, L. (1960). "Practical Aspects of Electro-Osmosis in Foundation Engineering", Proc. 1st Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 217-233.
- 10 - Chappel, B.A. & Burton, P.L. (1975). "Electro-Osmosis Applied to Unstable Embankment", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, no. GT 8, Vol. 101, August, pp. 733-740.

- 11 - Companhia do Metropolitano do Rio de Janeiro (1970). Relatório de Sondagens do Lote 2 de Construção. Não publicado.
- 12 - Correa, J. (1963). "Problemas de una Excavacion Profunda en Arcilla de la Ciudad de Mexico", Proc. 2 nd Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. II, pp. 189-210.
- 13 - Costet, J. & Sanglerat, G. (1974). Curso Practico de Mecanica de Suelos, Ediciones Omega, Barcelona, Espanha, pp. 146-147.
- 14 - Dawson, R.F. & Mc Donald, R.W. (1948). "Some Effects of Electric Current on the Consolidation Characteristics of a Soil", Proc. 2 nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 5, pp. 51-57.
- 15 - Endell, K & Hoffman, O. (1936). "Electro-Chemical Hardening of Clay Soils", Proc. 1 st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 273-275.
- 16 - Esrig, M.I. & Gemeinhardt, J. (1967). "Electrokinetic Stabilization of an Illitic Clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, no. SM 3 , May, p. 109.
- 17 - Esrig, M.I. (1968). "Pore Pressures, Consolidation, and Electrokinetics", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 94, no. SM 4, July, pp. 899-921.
- 18 - Evans, H. & Lewis, R. (1965). "A Theoretical Treatment of the Electro-Osmotic Consolidation of Soils", Civil Engineering, October, pp. 1-4.
- 19 - Fetzer, C.A. (1967). "Electro-osmotic Stabilization of West Branch Dam", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, no. SM 4, July, pp. 85-106.
- 20 - Geuze, E.C., de Bruyn, C.M.A. & Joustra, K. (1948). "Results of Laboratory Investigations on the Electrical Treatment of Soils", Proc. 2 nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 3, pp. 153-157.

- 21 - Gray, D.H. & Mitchell, J.K. (1967). "Fundamental Aspects of Eletro-Osmosis in Soils", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, no. SM8, November, pp. 209-236.
- 22 - Gray, D.H. (1970). "Electrochemical Hardening of Clays", Geotechnique 20, no. 1, pp. 81-93.
- 23 - Kondner, R.L. & Boyer, W.C. (1957). "Research on the Use of Electro-Osmosis in the Stabilization of Fine-Grained Soils", Proc. Highway Research Board, Vol. 36, pp. 783-793.
- 24 - Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1972). Mecanica de Suelos, Editorial Limusa Wiley, Mexico, 582 pp.
- 25 - Lewis, R.W. & Humpheson, C. (1973). "Numerical Analysis of Electro-Osmotic Flow in Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation, ASCE, no. SM8, August, pp. 603-616.
- 26 - Lomizé, G.M., Netushil, A.V. & Rzhanitzin, B.A. (1957). "Electro-Osmotic Processes in Clayey Soils and Dewatering During Excavations". Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol I, pp. 62-67.
- 27 - Maclean, D.G. & Rolfe, D.W. (1945). "Soil Drainage by an Electrical Method", Civil Engineering, Vol. 40, pp. 34-37.
- 28 - Michaels, A.S. (1959). Discussion, ASCE, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 85, no. SM2, April, pp. 91-101.
- 29 - Mitchell, J.K. & Campanella, R.G. (1964). "Creep Studies on Saturated Clays", Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP 361, pp. 90-103.
- 30 - Mitchell, J.K. (1970). "In-Place Treatment of Foundation Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, no. SM1, January, pp. 73-109.
- 31 - Mitchell, J.K. (1976). Fundamentals of Soil Behavior, Chapter 15, John Wiley and Sons, N. York.

- 32 - Murayama, S. & Mise, T. (1953). "On the Electrochemical Consolidation of Soil using Aluminium Electrodes", Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics Foundation Engineering, Vol. I, pp. 156-159.
- 33 - Nicholls, R. & Herbst, R. (1967). "Consolidation under Electrical-Pressure Gradients", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, no. SM5, September, pp. 139-151.
- 34 - Piakowski, A. (1957). "Investigation on Electro-Osmotic Flow in Soils in a Relation to Different Characteristics", Proc. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 89-92.
- 35 - Robnett, L. Q. (1973). "Subgrade Strengthening of Existing Airfield Runways", Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 99, no. TE2, May, pp. 267-287.
- 36 - Roderick, G. (1975). "Electro-Osmotic Reduction of the Ocean Bottom Breakout Forces and Times", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 12, no. 3, August, pp. 289-295.
- 37 - Simon, L., Nettleton, A. & Cordingley, G. (1954). "The Use of Electro-Osmosis for the Drainage of Non Saturated Silty Loam Pavement Sub-Bases", Proc. Second Australia-New Zealand Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 86-92.
- 38 - Soletanche (1953). Station D'Epuración de Bordeaux, Traitement Electro-Osmotique des Sols. Publicação Interna da Società Soletanche, 7 Rue de Logelbach, Paris, France.
- 39 - State of California, Departament of Public Works, Division of Highways, Materials and Research Department (1967). "Investigation of the Electro-Osmotic Method for Fill Foundation Stabilization". N o publicado.
- 40 - Tamez, E. & Flamand, C. (1960). "Excavaciones con el Auxilio de Electro-Osmosis en la Ciudad de Mexico", Proc. 1st Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 235-251.
- 41 - V y, E. (1949). "The Mechanics of Soil Consolidation by

Electro-Osmosis", Proceedings Highway Research Board, Vol. 29, pp.578-589.

- 42 - Vilela, T.V. (1976). "Determinação dos Parâmetros de Resistência, Creep e de Relaxação de Tensões de uma Argila Mole do Rio de Janeiro", Tese de Mestrado, Coordenação dos Prog. de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- 43 - Wan, D.T. (1970). "Consolidation of Soils by Electro-Osmosis", Ph. D. Examination Record, University of California at Berkeley.
- 44 - Wan, D. T. & Mitchell, J. K. (1976). "Electro-Osmotic Consolidation of Soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 102, no. 695, May, pp. 473-491.
- 45 - Wang, W. & Vey, E. (1953). "Stresses in a Saturated Soil Mass During Electro-Osmosis", Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. I, pp. 76-79.
- 46 - Winterkorn, H. F. (1947). "Fundamental Similarities between Electro-Osmotic and Thermo-Osmotic Phenomena", Proceedings Highway Research Board, Vol. 27, pp. 443-455.